АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2007, том 53, № 5, с. 672–677

ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 534.22:551.463

МЕТОД РАСЧЕТА СКОРОСТИ ЗВУКА ВО ВЗАИМНЫХ СИСТЕМАХ ПО ИЗВЕСТНЫМ КОНЦЕНТРАЦИЯМ ИОНОВ

© 2007 г. Д. А. Денисов

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева
125047 Москва, Миусская пл., 9
E-mail: vadov@akin.ru

Поступила в редакцию 18.07.06 г.

Предлагается метод расчета отклонений значения скорости звука в смешанном растворе, содержащем два вида катионов и два вида анионов, от значения скорости звука в чистой воде по известным концентрациям ионов в растворе и концентрационным зависимостям скорости звука в бинарных растворах солей, присутствующих в смешанном растворе. Метод основан на использовании правила ионной силы и гипотезы о равновероятном распределении ионов. Рассчитанные значения отклонений скорости звука в смешанном растворе от скорости звука в чистой воде (для температуры раствора 15°C и 25°C) неплохо согласуются с экспериментальными их значениями. Предложенный метод применен для расчета скорости звука в морской воде.

PACS: 43.35.Bf

Для расчета скорости звука в растворах смеси электролитов необходимо знание концентраций электролитов в смешанном растворе. Концентрации растворенных компонентов в растворе смеси электролитов с общим ионом полностью определяются концентрациями ионов в указанных системах [1]. Если раствор содержит не менее двух видов катионов и не менее двух видов анионов (такие растворы называют взаимными системами), знания концентраций ионов уже недостаточно для расчета концентраций электролитов. Для нахождения концентраций электролитов в таких системах требуется привлечь значения одного или двух термодинамических свойств смешанного раствора [2]. Расчет свойств смешанного раствора осуществляют при использовании свойств бинарных растворов, состоящих из воды и одного из растворенных компонентов. Более обоснованным является расчет с использованием свойств бинарных растворов, имеющих то же значение химического потенциала воды (μ_S), которое имеет смешанный раствор, иначе говоря, расчет с использованием свойств бинарных изопиестических растворов.

Более простым является метод, основанный на правиле ионной силы, согласно которому для расчета свойств смешанного раствора, в том числе и скорости звука, используются значения свойств бинарных растворов, имеющих то же значение ионной силы I, что и у смешанного раствора. Значение ионной силы I определяется соотношением [3]:

$$I = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{r} m_i(\nu_{i+}z_{i+}^2 + \nu_{i-}z_{i-}^2), \qquad (1)$$

где m_i – моляльность i-ого электролита в растворе, ν_{i+} и ν_{i-} – число катионов и число анионов, обладающих соответственно зарядами $z_{i+}e$ и $z_{i-}e$, образующихся при диссоциации молекулы i-ого электролита, e – абсолютная величина заряда электрона, r – число электролитов в растворе. Правило ионной силы уже около сотни лет используется для расчета термодинамических свойств смешанных растворов [3] и несколько десятилетий используется для расчета скорости звука, см., например, [4]. Расчет концентраций электролитов во взаимных системах может быть осуществлен без привлечения значений свойств смешанных растворов, если обратиться к гипотезе о равновероятном распределении ионов [5]. Следует отметить, что метод расчета скорости звука, основанный на термодинамике изопиестических растворов, используемый в работах [1, 2, 6], может быть применен для расчета скорости звука при разных температурах, если известны концентрационные зависимости μ_S при температурах, отличных от 25°C [7]. Однако для большинства электролитов в справочной литературе такие зависимости приведены лишь для 25°C.

Отмеченное обстоятельство не может служить препятствием для расчета скорости звука в смешанных растворах при разных температурах с помощью метода, основанного на правиле ионной силы, поскольку при его применении концентрационные зависимости μ_S не используются.

В данной работе расчет проводится для раствора, содержащего 4 иона: Na^+, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, Cl^-. Для такого раствора в одной из публикаций Мил-

Таблица 1. Рассчитанные и экспериментальные [8] значения разности $u_{mix} - u_W$ (м с$^{-1}$) для раствора, содержащего Na^+, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, при 15 и 25°C

t°C				15°C	15°C	25°C	25°C
m_{Na}	m_{Mg}	m_{Cl}	m_{SO_4}	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
0.04540	0.01162	0.04540	0.01162	4.87	4.86	4.44	4.40
0.10240	0.09278	0.10240	0.09278	19.90	19.94	18.36	18.56
0.16260	0.09830	0.19660	0.08130	24.00	24.25	22.74	22.33
0.23930	0.06098	0.23930	0.06098	24.82	24.65	23.10	22.56
0.24334	0.05020	0.10040	0.12167	25.09	25.52	23.96	23.70

леро и Чена [8] приведены экспериментальные данные по отклонению значений скорости звука в смешанном растворе u_{mix} от значений скорости звука в чистой воде u_W.

Гипотеза о равновероятном распределении ионов приводит к соотношениям, связывающим числа г-эквивалентов ионов и числа г-эквивалентов электролитов NaCl, Na_2SO_4, $MgCl_2$, $MgSO_4$, приходящихся на 1 кг воды, обозначаемых n_1, n_2, n_3, n_4, соответственно:

$$n_1 = n_{Na} n_{Cl} n^{-1},$$

$$n_2 = n_{Na} n_{SO_4} n^{-1},$$

$$n_3 = n_{Mg} n_{Cl} n^{-1},$$

$$n_4 = n_{Mg} n_{SO_4} n^{-1},$$

где n – полное число г-эквивалентов катионов, приходящихся на 1 кг чистой воды.

Учитывая связь числа г-эквивалентов электролитов, приходящихся на 1 кг чистой воды, и его моляльности m_i [3]

$$n_i = \nu_i |Z_{i+} Z_{i-}| (Z_{i+} + |Z_{i-}|)^{-1} m_i,$$

где ν_i – число ионов, образующихся при диссоциации молекулы i-ого электролита, а также формулу для числа г-эквивалентов катионов, приходящихся на 1 кг чистой воды в рассматриваемом смешанном растворе

$$n = m_{Na} + 2m_{Mg},$$

придем к соотношениям, связывающим моляльности солей и моляльности ионов:

$$m_1 = m_{Na} m_{Cl} (m_{Na} + 2m_{Mg})^{-1},$$

$$m_2 = m_{Na} m_{SO_4} (m_{Na} + 2m_{Mg})^{-1},$$

$$m_3 = m_{Mg} m_{Cl} (m_{Na} + 2m_{Mg})^{-1},$$

$$m_4 = 2m_{Mg} m_{SO_4} (m_{Na} + 2m_{Mg})^{-1}.$$

В соответствии с правилом ионной силы, разность $(u_{mix} - u_W)$ связана с отклонениями скорости звука в бинарных растворах $(u_i(I) - u_W)$, имеющих то же значение I, что и смешанный раствор, соотношением

$$u_{mix} - u_W = I^{-1}\{m_1[u_1(I) - u_W] + 3m_2[u_2(I) - u_W] + + 3m_3[u_3(I) - u_W] + 4m_4[u_4(I) - u_W]\}. \quad (2)$$

Значение I для рассматриваемого смешанного раствора связано с моляльностями четырех упомянутых электролитов вытекающим из формулы (1) соотношением

$$I = m_1 + 3(m_2 + m_3) + 4m_4.$$

Предлагаемый метод расчета скорости звука в растворе, содержащем два вида катионов и два вида анионов, является более простым по сравнению с методом, описанным в работе [8]. Данные о скорости звука в бинарных растворах при разных температурах, необходимые для расчета разности $u_{mix} - u_W$, приведены в работах [9, 10]. Экспериментальные значения $u_{mix} - u_W$ в работе [8] получены при частоте 2 кГц. Экспериментальные значения разностей $u_j(I) - u_W$, используемые в настоящей работе для расчета значений разности $u_{mix} - u_W$, получены при частотах 1.8 МГц и 2.0 МГц [9, 10]. Возможности сопоставления рассчитанных по значениям скорости звука в бинарных растворах значений разности $u_{mix} - u_W$ с экспериментальными значениями $u_{mix} - u_W$ [8] благоприятствует то обстоятельство, что сравниваются не абсолютные значения скорости звука в растворах, а отклонения указанных скоростей звука в смешанном растворе от скорости звука в чистой воде. Результаты расчета приведены в таблице 1. Наблюдается неплохое согласие между расчетными и экспериментальными значениями $(u_{mix} - u_W)$.

Предлагаемый метод может быть применен и для расчета скорости звука в морской воде по известным концентрациям ионов. В настоящее время влияние состава растворенных компонентов в морской воде на значение скорости звука в ней u_{mix} учитывается с помощью единственной пере-

Таблица 2. Отношение массовых концентраций ионов

Отношение массовых концентраций ионов	Океан	Черное море	Красное море	Рижский залив	Каспийское море	Таганрогский залив	Аральское море
Na^+/Cl^-	0.553	0.567	0.556	0.554	0.595	0.557	0.532
Mg^{2+}/SO_4^{2-}	0.484	0.507	0.476	0.494	0.243	0.443	0.239
Mg^{2+}/Cl^-	0.067	0.068	0.067	0.070	0.137	0.089	0.220
K^+/SO_4^{2-}	0.144	0.134	0.142	0.144	0.028	0.111	0.034
Ca^{2+}/SO_4^{2-}	0.022	0.024	0.021	0.029	0.065	0.030	0.031

менной – солености (S). Использование единственной переменной, как следует из определения S [11], обусловлено постоянством отношений основных растворенных компонентов или постоянством отношений концентраций основных ионов. Однако, указанное постоянство не соблюдается в морях, имеющих ограниченный водообмен с океаном, подверженных значительному влиянию речного стока. В таблице 2 отношения массовых концентраций ионов, рассчитанные на основе данных [12–17], приведены как для океана, так и для вод Черного, Каспийского, Аральского, Красного морей, а также Рижского и Таганрогского заливов, – для этих регионов правомерность использования солености при рассмотрении влияния состава растворенных компонентов на свойства морской воды не очевидна.

Как следует из данных по ионному составу морской воды при $S = 35.004‰$ [11], концентрации каждого из 6 основных ионов (Na^+, Mg^{2+}, K^+, Ca^{2+}, SO_4^{2-}, Cl^-) превосходят суммарные концентрации остальных ионов и нейтральных веществ. В качестве одной из моделей морской воды в настоящей работе рассматривается раствор, содержащий 4 иона (Na^+, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, Cl^-), в котором за моляльность ионов Na^+ (m_{Na}) принимается сумма моляльностей Na^+ и K^+, отвечающих рассматриваемой морской воде, за моляльность Mg^{2+} (m_{Mg}) принимается сумма моляльностей Mg^{2+} и Ca^{2+}, отвечающих рассматриваемой морской воде, за моляльность SO_4^{2-} (m_{SO_4}) принимается моляльность этого иона в морской воде при данной солености S, моляльность Cl^- (m_{Cl}) рассчитывается из условия электронейтральности рассматриваемого смешанного раствора. В соответствии со сказанным, при $S = 35.004‰$ моляльности ионов в растворе, моделирующем морскую воду, имеют следующие значения: $m_{Na} = 0.49565$, $m_{Mg} = 0.06595$, $m_{SO_4} = 0.02926$, $m_{Cl} = 0.56900$. Значение ионной силы в таком растворе $I = 0.72274$. На практике предлагаемый метод расчета целесообразно использовать для морей с ограниченным водообменом, в которых значения отношений концентраций ионов заметно отличаются от соответствующих значений, присущих океану.

В настоящей работе метод применен для расчета значений разности $u_{mix} - u_W$ в морской воде при 8 значениях S, для которых экспериментальные значения $u_{mix} - u_W$ приведены в работе [18]. Моляльность Na^+ в морской воде при значении солености S_j, отличном от $S_0 = 35.004‰$, может быть определена (при постоянных отношениях концентраций ионов) по формуле

$$m_{Na}(S_j) = m_{Na}(S_0)S_j(S_j + 1)[S_0(S_0 + 1)]^{-1}.$$

вытекающей из соотношения, отвечающего определению солености [11]:

$$m_{Na}\left(M_{Na} + \frac{m_{Mg}}{m_{Na}}M_{Mg} + \frac{m_{SO_4}}{m_{Na}}M_{SO_4} + \frac{m_{Cl}}{m_{Na}}M_{Cl}\right) = S(S + 1), \quad (3)$$

где M_{Na}, M_{Mg}, M_{SO_4}, M_{Cl} – массы молей соответствующих ионов. Используя значения отношений концентраций ионов, отвечающих $S_0 = 35.004‰$ [11], нетрудно найти значение $m_{Na}(S_j)$, отвечающее интересующему нас значению S_j, а затем, учитывая постоянство отношений концентраций ионов, найти моляльности остальных ионов. Во втором столбце таблицы 3 приведены рассчитанные, согласно указанной модели, для 25°C значения разности $u_{mix} - u_W$, которые неплохо согласуются с экспериментальными значениями $u_{mix} - u_W$ [18], приведенными в последнем столбце.

В качестве модели морской воды в настоящей работе рассматривается также раствор, содержащий 6 ионов Na^+, Mg^{2+}, K^+, Ca^{2+}, SO_4^{2-}, Cl^-. При этом моляльности первых пяти ионов принимаются равными моляльностям этих ионов в морской воде при $S = 35.004‰$, моляльность ионов Cl^- (m_{Cl}), как и в предыдущем случае, рассчитывается из условия электронейтральности рассматривае-

мого смешанного раствора. Значению солености S = 35.004‰ отвечают следующие моляльности ионов: $m_{Na} = 0.48508$, $m_{Mg} = 0.05529$, $m_K = 0.01058$, $m_{Ca} = 0.01065$, $m_{SO_4} = 0.02926$, $m_{Cl} = 0.56900$. Значение I для рассматриваемого смешанного раствора также равно 0.72274. Поскольку присутствием $CaSO_4$ в смешанном растворе пренебрегаем, $m_7 = m_{Ca}$, и следует говорить о равновероятном распределении анионов SO_4^{2-} между катионами Na^+, Mg^{2+}, K^+. Смесь приведенных выше 6 ионов можно рассматривать как смесь 7 солей NaCl, Na_2SO_4, $MgCl_2$, $MgSO_4$, KCl, K_2SO_4, $CaCl_2$. Величины, относящиеся к солям KCl, K_2SO_4, $CaCl_2$ будут отмечены индексами 5, 6, 7, соответственно. Числа г-эквивалентов ионов и числа г-эквивалентов солей, приходящихся на 1 кг чистой воды, в соответствии с гипотезой о равновероятном распределении ионов, связаны следующими соотношениями:

$$n_1 = n_{Na}\tilde{n}_{Cl}(\tilde{n})^{-1}, \quad (4)$$

$$n_2 = n_{Na}n_{SO_4}(\tilde{n})^{-1}, \quad (5)$$

$$n_3 = n_{Mg}\tilde{n}_{Cl}(\tilde{n})^{-1}, \quad (6)$$

$$n_4 = n_{Mg}n_{SO_4}(\tilde{n})^{-1}, \quad (7)$$

$$n_5 = n_K\tilde{n}_{Cl}(\tilde{n})^{-1}, \quad (8)$$

$$n_6 = n_K n_{SO_4}(\tilde{n})^{-1}, \quad (9)$$

где $\tilde{n}$ – суммарное число г-эквивалентов катионов Na^+, Mg^{2+}, K^+, приходящихся на 1 кг чистой воды,

$$\tilde{n} = n_{Na} + n_{Mg} + n_K,$$

$\tilde{n}_{Cl}$ – число г-эквивалентов Cl^-, распределяемых между катионами Na^+, Mg^{2+}, K^+, приходящихся на 1 кг чистой воды

$$\tilde{n}_{Cl} = n_{Cl} - n_{Ca}$$

n_{Cl} – полное число г-эквивалентов Cl^-, приходящихся на 1 кг чистой воды.

Из соотношений (4)–(9) следуют формулы, связывающие моляльности ионов и моляльности солей

$$m_1 = m_{Na}\tilde{m}_{Cl}(m_{Na} + m_K + 2m_{Mg})^{-1},$$

$$m_2 = m_{Na}m_{SO_4}(m_{Na} + m_K + 2m_{Mg})^{-1},$$

$$m_3 = m_{Mg}\tilde{m}_{Cl}(m_{Na} + m_K + 2m_{Mg})^{-1},$$

$$m_4 = 2m_{Mg}m_{SO_4}(m_{Na} + m_K + 2m_{Mg})^{-1},$$

$$m_5 = m_K\tilde{m}_{Cl}(m_{Na} + m_K + 2m_{Mg})^{-1},$$

$$m_6 = m_K m_{SO_4}(m_{Na} + m_K + 2m_{Mg})^{-1}.$$

Таблица 3. Результаты расчета разности $u_{mix} - u_W$ при 25°C методом, основанным на правиле ионной силы и на гипотезе о равновероятном распределении ионов

S‰	$u_{mix} - u_W$, м с$^{-1}$ (4 иона)	$u_{mix} - u_W$, м с$^{-1}$ (6 ионов)	$u_{mix} - u_W$, м с$^{-1}$ (Эксперимент)
5.024	5.48	5.47	5.51
10.051	11.10	11.00	10.97
15.142	16.66	16.67	16.47
20.000	21.73	20.99	21.60
24.943	26.39	26.83	26.91
30.031	32.97	32.22	32.42
35.003	38.59	37.17	37.70
40.025	44.00	42.91	43.17

Для значений S, приведенных в [18], при использовании значений отношений концентраций ионов, характерных для океана [11], рассчитаны моляльности ионов в морской воде. Значение m_{Na} рассчитывается по формуле, аналогичной (3):

$$m_{Na}\left(M_{Na} + \frac{m_{Mg}}{m_{Na}}M_{Mg} + \frac{m_K}{m_{Na}}M_K + \frac{m_{SO_4}}{m_{Na}}M_{SO_4} + \right.$$
$$\left. + \frac{m_{Ca}}{m_{Na}}M_{Ca} + \frac{m_{Cl}M_{Cl}}{m_{Na}}\right) = S(S+1),$$

где M_K и M_{Ca} – массы молей K^+ и Ca^{2+}. Учитывая постоянство отношений концентраций ионов при изменении S, можно найти моляльности остальных ионов.

Согласно (1), для раствора, содержащего 7 солей: NaCl, Na_2SO_4, $MgCl_2$, $MgSO_4$, KCl, K_2SO_4, $CaCl_2$, значение I может быть найдено по формуле

$$I = m_1 + m_5 + 3(m_2 + m_3 + m_6 + m_7) + 4m_4,$$

из которой следует соотношение, связывающее разности $u_{mix} - u_W$ и $u_j(I) - u_W$, аналогичное (2)

$$(u_{mix} - u_W)I = m_1[u_1(I) - u_W] + m_5[u_5(I) - u_W] +$$
$$+ 4m_4[u_4(I) - u_W] + 3m_2[u_2(I) - u_W] +$$
$$+ 3m_3[u_3(I) - u_W] + 3m_6[u_6(I) - u_W] +$$
$$+ 3m_7[u_7(I) - u_W].$$

Во втором и третьем столбцах таблицы 4 приведены значения $u_{mix} - u_W$, рассчитанные с использованием двух моделей, в четвертом столбце приведены экспериментальные значения этих отклонений. Как видно из данных, представленных в таблицах 3 и 4, по сравнению с первой моделью значения $u_{mix} - u_W$, рассчитанные по второй модели, представляющей морскую воду как раствор, содержащий 6 ионов, согласуются с экспериментальными их значениями несколько лучше (как при температуре 25°C, так и при температуре

Таблица 4. Результаты расчета разности $u_{mix} - u_W$ при использовании моделей, содержащих 4 иона (I) и 6 ионов (II), для температуры 35°C, а также отношений $\Delta(u_{mix} - u_W)/\Delta T$

S‰	$u_{mix} - u_W$ м с$^{-1}$ (I)	$u_{mix} - u_W$ м с$^{-1}$ (II)	$(u_{mix} - u_W)^{exp}$ м с$^{-1}$	$\frac{\Delta(u_{mix} - u_W)}{\Delta T}$ м с$^{-1}$ K^{-1} (I)	$\frac{\Delta(u_{mix} - u_W)}{\Delta T}$ м с$^{-1}$ K^{-1} (II)	$\frac{\Delta(u_{mix} - u_W)^{exp}}{\Delta T}$ м с$^{-1}$ K^{-1}
5.024	5.13	5.04	5.19	–0.035	–0.043	–0.032
10.057	10.38	10.39	10.24	–0.072	–0.061	–0.073
15.142	15.27	15.58	15.45	–0.116	–0.095	–0.100
20.000	20.31	20.05	20.32	–0.142	–0.147	–0.129
24.943	25.13	25.23	25.23	–0.178	–0.168	–0.168
30.031	30.36	30.15	30.15	–0.206	–0.221	–0.210
35.003	35.98	34.74	35.35	–0.261	–0.243	–0.237
40.025	41.05	40.13	40.47	–0.295	–0.279	–0.270

35°C). В последних трех столбцах таблицы 4 даны отношения изменений разности $u_{mix} - u_W$, рассчитанных с помощью двух моделей при изменении температуры от 25°C до 35°C, к разности температур (10°), а также их экспериментальные значения. Эти значения могут рассматриваться как оценки производных от $u_{mix} - u_W$ по температуре, которые присутствуют в формуле для расчета параметра нелинейности [19].

При использовании модели, представляющей морскую воду как раствор, содержащий 6 ионов, помимо данных работ [9, 10], использовались сведения, приведенные в работах [4, 20–23].

Из сопоставления данных, приведенных в таблицах 3 и 4, видно, что, как и следовало ожидать, модель раствора, содержащего 6 ионов, приводит к несколько меньшему отклонению рассчитанных значений $u_{mix} - u_W$ от экспериментальных данных, чем модель раствора, содержащего 4 иона. Абсолютные значения этих отклонений возрастают с увеличением солености.

В заключение следует отметить, что при использовании линейной интерполяции участков экспериментальных концентрационных зависимостей скорости звука в бинарных растворах предлагаемый метод позволяет осуществить расчет с помощью обычного калькулятора в то время, как предложенный ранее метод [1, 2, 6] связан с использованием итерационных процессов и, очевидно, без помощи ЭВМ неосуществим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Денисов Д.А.* Расчет скорости звука в растворах, содержащих два растворенных компонента // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 6. С. 777–782.
2. *Денисов Д.А., Абрамова Е.П., Абрамов А.В.* Метод расчета скорости звука в морской воде // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 4. С. 494–500.
3. *Харнед Г., Оуэн Б.* Физическая химия растворов электролитов / пер. с англ. И.С. Липилиной и М.С. Стахановой под ред. чл.-корр. АН СССР А.Ф. Капустинского. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1952. 652 с.
4. *Vilcu R., Simion A.* Acoustic and volumetric properties of aqueous salt solutions // Revue Roumanic de Chimie. 1976. V. 21. № 1. P. 3–9.
5. *Микулин Г.И., Вознесенская И.Е.* Теория смешанных растворов электролитов, подчиняющихся правилу Здановского. III. Четверные взаимные системы // Вопросы физической химии растворов электролитов. Л.: Химия, 1968. С. 346–360.
6. *Денисов Д.А., Абрамова Е.П., Абрамов А.В.* Расчет скорости звука в морской воде по известным концентрациям ионов // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 5. С. 609–613.
7. *Hu J.F.* New predictive equations for the specific and apparent molar heat capacities of multicomponent systems conforming to the linear isopiestic relation// Bull. Chem. Soc. Japan. 2001. V. 74. № 1. P. 47–52.
8. *Millero F.J., Chen C.A.* The speed of sound in mixtures of the major sea salts/A test of Young's rule for adiabatic PVT properties // Journ. Solution Chemistry. 1985. V. 14. № 4. P. 301–310.
9. *Millero F.J., Ricco J., Schreiber D.R.* PVT properties of concentrated aqueous electrolytes. II. Compressibilities and apparent molar compressibilities of aqueous NaCl, Na_2SO_4, $MgCl_2$, and $MgSO_4$ from dilute solution to saturation and from 0 to 50°C // Journ. Solution Chemistry. 1982. V. 11. № 10. P. 671–686.
10. *Millero F.J., Vinokurova F., Marino F., Hershey P.J.* PVT properties of concentrated electrolytes. VI. The speed of sound and apparent molal compressibilities of NaCl, Na_2SO_4, $MgCl_2$, and $MgSO_4$ solutions from 0 to 100°C // Journ. Solution Chemistry. 1987. V. 16. № 4. P. 269–284.
11. *Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М.* Морская вода. Справочное руководство. М.: Наука, 1979. 328 с.

12. *Синюков В.В.* Развитие морских гидрохимических исследований. Черное, Азовское и Арктическое моря. М.: Наука, 1993. 225 с.
13. *Касымов А.Г.* Каспийское море. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1987. 152 с.
14. *Симонов А.Н., Затучная Б.М.* Основные задачи в изучении гидрохимии морей Советского Союза и их решение на современном этапе // Химия и биология морей / Под ред. д-ра географ. наук А.Н. Симонова. М.: Гидрометеоиздат, 1987. С. 5–13.
15. *Бортник В.Н.* Основные этапы дальнейших изменений гидролого-гидрохимического режима Аральского моря // Там же. С. 13–17.
16. Красное море / Под ред. д-ра физ.-матем. наук В.Н. Еремеева, д-ра географ. наук А.Н. Косарева. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. 166 с.
17. *Алехин О.А., Лехин Ю.И.* Химия океана. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1984. 344 с.
18. *Millero Frank J., Kubinski T.* Speed of sound in seawater as a function of temperature and salinity at 1 atm // J. Acoust. Soc. Amer. 1975. V. 57. № 2. P. 312–319.
19. *Beyer R.T., Letcher S.V.* Physical Ultrasonics. London. Academic Press, 1969. 378 p.
20. Справочник химика. 2-е изд. перераб. дополнен. Т. 3. М.–Л.: Химия, 1964. 1006 с.
21. *Василев В.А.* Расчет плотности и теплоемкости водных растворов неорганических соединений. М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1979. 48 с.
22. Техническая энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. Гл. ред. Л.К. Мартенс. М.: Акционерное об-во: Советская энциклопедия, 1930. Т. 5. С. 215–235.
23. *Прозоров П.* Сжимаемость водных растворов сильных электролитов // Журн. физич. химии. 1940. Т. 14. Вып. 3. С. 384–390.

Calculation of the Speed of Sound in Reciprocal Systems from the Known Ion Concentrations

D. A. Denisov

Mendeleev University of Chemical Technology, Miusskaya pl. 9, Moscow, 125047 Russia

e-mail: vadov@akin.ru

Received July 18, 2006

Abstract—A method of calculating the deviations of the speed of sound in a mixed solution containing two types of cations and two types of anions from the speed of sound in pure water by using the known ion concentrations in the solution and the concentration dependences of the speed of sound in binary solutions of the salts entering the mixed solution is proposed. The method is based on the ionic strength rule and the equiprobable ion distribution hypothesis. The calculated values of the deviations of the speed of sound in a mixed solution from the speed of sound in pure water (for solution temperatures of 15 and 25°C) are in a fairly good agreement with experimental data. The proposed method is applied for calculating the speed of sound in seawater.