

УДК 536.6:544.355-122

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭНТАЛЬПИЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ МОЛЕКУЛАМИ МОЧЕВИНЫ И ТЕТРАМЕТИЛМОЧЕВИНЫ В ФОРМАМИДЕ, ЭТИЛЕНГЛИКОЛЕ И ВОДЕ ПРИ 298.15 К

© 2022 г. Д. В. Батов<sup>а,\*</sup>, Е. В. Иванов<sup>а</sup><sup>а</sup> Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

\*e-mail: bat21dv@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.10.2021 г.

После доработки 13.10.2021 г.

Принята к публикации 14.10.2021 г.

С целью изучения проявлений сольвофильных и сольвофобных эффектов в растворителях с пространственной сеткой водородных связей измерены энтальпии разведения растворов мочевины (М) в формамиде (ФА) и этиленгликоле (ЭГ), а также тетраметилмочевины (ТММ) в ФА при 298.15 К. Из полученных калориметрическим методом результатов вычислены энтальпийные гомотактические коэффициенты парных ( $h_{22}$ ) и тройных ( $h_{222}$ ) взаимодействий между сольватированными молекулами растворенного вещества (М или ТММ). Проведено сравнение рассчитанных величин с литературными данными для растворов М и ТММ в воде ( $H_2O$ ) и ТММ в ЭГ. Установлено, что, в отличие от эффектов 2–2-взаимодействия в системах (ЭГ + М) и ( $H_2O$  + М), параметр  $h_{22}$  для М в ФА имеет положительный знак и весьма незначителен по абсолютной величине ( $\sim 160$  Дж кг моль<sup>-2</sup>). На основании этого сделан вывод о наличии комплементарности в ассоциированных посредством Н-связей структурах растворителя (*in bulk*) и образующегося в нем сольватоконплекса М – ФА. Характер распределения значений  $h_{22}$  для ТММ в ряду сольватирующих сред ФА ( $\sim 587$ ) < ЭГ ( $\sim 649$ )  $\ll$   $H_2O$  ( $\sim 2346$  Дж кг моль<sup>-2</sup>) свидетельствует о существенно возрастающей роли сольвофобных эффектов в водном растворе.

**Ключевые слова:** растворы мочевины и тетраметилмочевины, энтальпийные параметры взаимодействия

DOI: 10.31857/S0044453722040069

Известно, что, используя термодинамический подход как “инструмент” исследования раствора, не представляется возможным извлечь полную информацию об энергетических аспектах взаимодействия непосредственно на молекулярном уровне. В то же время важный шаг в этом направлении позволяет сделать анализ некоторых характеристик, таких как молярные энтальпии смешения ( $H^E$ ) и разбавления ( $\Delta_{dil}H^S$ ). В свою очередь, эти величины служат экспериментальной основой для оценки (в рамках модельных приближений) энтальпийных параметров парного ( $h_{22}$ ), тройного ( $h_{222}$ ) или более высокого порядка взаимодействия между молекулами одного и того же (2) или нескольких растворенных веществ (2, 3, ...) [1–7]. В случае бинарного раствора эти параметры определяются как *гомотактические* [2, 4].

Результаты проведенных нами ранее исследований [3, 6–9] наглядно продемонстрировали обоснованность применения процедуры расчета

$h_{22}$  для выявления специфических особенностей межмолекулярных взаимодействий в ассоциированных посредством Н-связей растворах мочевины (М) и ее N-метилзамещенных производных. Особый интерес в этом смысле вызывает сравнение эффектов 2–2-взаимодействия в воде и сольватирующих средах органической природы с пространственной сеткой водородных связей. Для образования подобного рода (“водоподобной”) сетки молекула растворителя формально должна обладать, как минимум, двумя протонодонорными и двумя протоноакцепторными центрами [7, 10–12]. Таким условиям отвечает довольно узкий круг органических растворителей, среди которых достаточно большое внимание уделяется этиленгликолю (ЭГ) и формамиду (ФА) как сольватирующим средам с довольно выраженными проявлениями не только сольвофильных, но и сольвофобных эффектов [6, 7, 13–18].

Для идентификации указанных эффектов в наших работах [3, 6–9, 16–18] в качестве раство-

Таблица 1. Характеристики исследованных соединений

Свойство	ЭГ	ФА	ТММ	М
Брутто-формула	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> NO	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O
Молярная масса, г моль <sup>-1</sup>	62.0684	45.0410	116.1632	60.0556
Регистр. № CAS	107-21-1	75-12-7	632-22-4	57-13-6
Название по ИЮПАК	этан-1,2-диол	формамид	1,1,3,3-тетраметил-мочевина	мочевина
Источник происхождения	Sigma-Aldrich Co.	Sigma-Aldrich Co.	Sigma-Aldrich Co.	Merck KGaA
Исходная степень чистоты, мол. доли	≥0.998	≥0.995	≥0.995	≥0.995
Метод очистки от примесей	вакуум-перегонка при ~335 К	вакуум-перегонка при ~353 К	вакуум-перегонка при ~313 К	перекристаллизация из этанола
Степень чистоты перед опытами, мол. доли	>0.999	>0.999	>0.999	≥0.9995
Метод анализа чистоты	ВЭЖС	ВЭЖС	ВЭЖС	ВЭЖС
Содержание воды (по Фишеру), мас. %	0.007	0.010	0.010	0.005

ренных в ЭГ и ФА веществ использовались М и тетраметилмочевина (ТММ), молекулы которых обладают “типичными” гидрофильными и гидрофобными свойствами, соответственно, в водной среде. Вместе с тем, кроме результатов термодинамического исследования водных растворов М и ТММ [2, 3, 7–9], данные по  $h_{22}$  ( $h_{222}$ ) на сегодняшний день имеются фактически только для системы ЭГ + ТММ [6, 7].

Исходя из этого, мы посчитали необходимым восполнить указанный пробел и провести дополнительные экспериментальные исследования систем ЭГ + М и ФА + М (ТММ) методом калориметрии разведения растворов с целью получения соответствующих значений  $h_{22}$  ( $h_{222}$ ) при  $T = 298.15$  К.

Важным представлялось также изучение вопроса о наличии физически обоснованных корреляционных соотношений между величинами  $h_{22}$  и имеющимися в литературе данными по объемным параметрам парного 2–2-взаимодействия ( $v_{22}$ ) для сравниваемых жидких бинарных систем.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В табл. 1 представлены данные о показателях качества использованных в калориметрических опытах образцов растворителей и кристаллической М.

Все приведенные в табл. 1 жидкофазные соединения (ЭГ, ФА и ТММ) непосредственно перед дистилляцией (под вакуумом) осушали 0.4-нм молекулярными ситами. Предварительно очищенный образец М помещали в вакуумированный шкаф на 48 ч при  $T = 310$  К. Подготовлен-

ные для экспериментов химпрепараты хранили в светонепроницаемом сухом боксе или эксикаторе над P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Энтальпийные эффекты разведения растворов  $\Delta_{\text{dil}}H^S$  измеряли при 298.15 К и атмосферном давлении с помощью автоматического изопериболического калориметра ампульного типа, снабженного титановым сосудом объемом 30 см<sup>3</sup>. После каждого опыта проводили электрическую калибровку калориметра. Температурная чувствительность прибора составляла 10<sup>-5</sup> К, а нестабильность поддержания температуры в термостатирующей оболочке не превышала 10<sup>-3</sup> К. Процедуры калибровки прибора и проведения экспериментальных опытов подробно описаны в работах [3, 5, 19].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные (с погрешностью не более 5%) данные по  $\Delta_{\text{dil}}H^S$  для всех исследованных нами систем приведены в табл. 2, где  $m_{i,2}$  и  $m_{f,2}$  – соответственно начальная и конечная молярности раствора, определенные с погрешностью, не превышающей  $1 \times 10^{-4}$  моль на 1 кг растворителя.

Для вычисления значений  $h_{22}$  и  $h_{222}$  из данных табл. 2 использовали известное МНК-полиномиальное разложение, основанное на формализме теории Макмиллана–Майера [1–5, 20]:

$$\Delta_{\text{dil}}H^S(m_{i,2} \rightarrow m_{f,2}) = h_{22}m_{f,2}(m_{f,2} - m_{i,2}) + h_{222}m_{f,2}(m_{f,2}^2 - m_{i,2}^2) + \dots \quad (1)$$

Выбор степени полинома (1) обосновывался критерием значимости его коэффициентов по отно-

**Таблица 2.** Значения энтальпийных эффектов разведения растворов мочевины и тетраметилмочевины в этиленгликоле и формамиде ( $\Delta_{\text{dil}}H^S$ , Дж кг<sup>-1</sup>) при  $T = 298.15$  К и  $p = 0.1$  МПа

ЭГ + М			ФА + М			ФА + ТММ		
$m_{i,2}$	$m_{f,2}$	$\Delta_{\text{dil}}H^S$	$m_{i,2}$	$m_{f,2}$	$\Delta_{\text{dil}}H^S$	$m_{i,2}$	$m_{f,2}$	$\Delta_{\text{dil}}H^S$
0.9800	0.0207	-4.0	0.9988	0.0166	-1.7	1.0020	0.0122	-5.6
0.9800	0.0186	-4.4	0.9988	0.0123	-1.2	1.0020	0.0134	-6.1
0.9800	0.0175	-5.1	0.9988	0.0138	-1.4	1.0020	0.0237	-11.1
0.9800	0.0106	-3.0	1.6055	0.0226	-2.5	1.2976	0.0121	-6.6
0.9800	0.0192	-4.1	1.6055	0.0247	-2.6	1.2976	0.0165	-8.7
1.3108	0.0228	-18.9	1.2989	0.0183	-2.1	1.5950	0.0167	-9.7
1.3108	0.0260	-20.6	1.2989	0.0198	-2.2	1.5950	0.0285	-15.8
1.5950	0.0137	-21.2						
1.5950	0.0246	-39.4						
1.5950	0.0327	-56.9						

шению к их 95%-му доверительному интервалу. Кроме того, теоретические нулевые значения  $\Delta_{\text{dil}}H^S$ , представляющие собой “базовый” уровень теплоты (при растворении чистого растворителя в нем самом), также включали в процедуру аппроксимации.

Результаты расчетов по уравнению (1) с использованием данных табл. 2 суммированы в табл. 3. В табл. 3 включены также имеющиеся в литературе данные по гомотактическим коэффициентам межмолекулярного 2–2-взаимодействия для соответствующих водных растворов, а также для системы ЭГ + ТММ.

В табл. 4 содержатся полученные к настоящему времени сведения о тепловых эффектах растворения как М, так и ТММ в рассматриваемых нами жидких средах. Анализируя данные табл. 4, можно согласиться с мнением авторов работы [17] о том, что в термохимическом смысле ФА представляется более “водоподобным” растворителем, чем ЭГ. Этот вывод подтверждается и характером распределения парциальных молярных теплоемкостей М и ТММ ( $C_p^\circ$ , Дж моль<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup>) [17, 23]: 86 (Н<sub>2</sub>О) < 160 (ФА) < 199 (ЭГ) и 268 (ЭГ) < 291 (ФА) < 463 (Н<sub>2</sub>О).

Вместе с тем, результаты исследования объемных эффектов растворения и взаимодействия М и ТММ в ФА, ЭГ и водной среде [16, 18] указывают на правомерность сделанного в [17] вывода только в отношении ТММ. Так, имеет место факт заметного возрастания (в несколько раз) положительных значений  $h_{22}$  для ТММ в водной среде при их относительной сопоставимости в ЭГ и ФА (см. табл. 3). При этом во всех случаях  $h_{22} \gg 0$ , что указывает на доминирование эффекта отталкивания взаимодействующих молекул ТММ, заметно возрастающего при переходе к водным растворам. Такое поведение, свойственное гидрофоб-

ным частицам среднего размера [7, 24–26], вероятнее всего, обусловлено усилением клатратообразования около метильных групп при перекрывании гидратных (сольватных) ко-сфер молекул ТММ, что в целом способствует разобщению последних [8].

Очевидно, что при анализе эффектов взаимодействия в рассматриваемых растворах, наряду с энергетическим фактором, следует принимать во внимание и особенности структурной упаковки, обусловленные взаимным расположением молекул во вновь сформированных “сольватокмплексах” (конфигурационный фактор). Последнее обстоятельство, по-видимому, оказывает более заметное влияние на процесс образования

**Таблица 3.** Численные значения энтальпийных коэффициентов парного ( $h_{22}$ ) и тройного ( $h_{222}$ ) взаимодействий между сольватированными молекулами мочевины или тетраметилмочевины в воде и сравниваемых органических средах при  $T = 298.15$  К. В скобках приведены стандартные погрешности

Система	$h_{22}$ , Дж кг моль <sup>-2</sup>	$h_{222}$ , Дж кг <sup>2</sup> моль <sup>-3</sup>
ФА + М	161(5), ~55 [21]*	-57(4)
ФА + ТММ	587(19)	-87(11)
ЭГ + М	-1003(75)	1247(65)
ЭГ + ТММ	649(17) [6, 7]	-178(13) [6, 7]
Н <sub>2</sub> О + М	-352(24) [7], -330(10) [9], -351(3) [22]	25(13) [7]
Н <sub>2</sub> О + ТММ	2346(163) [7], 2063(35) [3], 2060(50) [9]	-240(84) [7], -122(6) [3]

\* Рассчитано нами на основе данных по  $\Delta_{\text{dil}}H^S(m_{i,2} \rightarrow m_{f,2})$  [21] с применением уравнения (1).

**Таблица 4.** Стандартные энтальпийные эффекты растворения ( $\Delta_{\text{sol}}H_2^\circ$ , кДж моль<sup>-1</sup>), мочевины или тетраметилмочевины в воде, этиленгликоле и формамиде при  $T = 298.15$  К. В скобках приведены стандартные погрешности

Соединение	H <sub>2</sub> O	ЭГ	ФА
М	15.33 (0.03) [23]	5.38 (0.02) [17]	9.54 (0.04) [17]
ТММ	-24.43 (0.02) [23]	-3.37 (0.02) [17]	-9.18 (0.04) [17]

агрегатов с участием гидрофильных молекул М в среде органического растворителя.

Дипольные молекулы М могут ассоциироваться либо в антипараллельной (бок о бок), либо в параллельной (голова к хвосту) модели [27]. Какая схема “будет выбрана” мочевиной может зависеть от растворителя. Данные по водному раствору М [28] предполагают модель цепочки “голова к хвосту” с энтальпией ассоциации – 7 кДж/моль. На это указывают величины осмотических коэффициентов и кажущиеся молярные энтальпии водных растворов М.

Большая отрицательная величина  $h_{22}$  М в ЭГ по аналогии с водным раствором может указывать также на цепную модель ассоциатов М в ЭГ. Отрицательные значения  $h_{22}$  определяются в основном доминированием энергии М – М-взаимодействия над энергией десольватации молекул М. В данном случае величину и порядок изменения  $h_{22}$  можно связать со следующими явлениями. Очевидно, что Н-связи, образованные между молекулами М и гидроксильными группами воды или ЭГ, близки по энергии. Размещение цепочки “голова к хвосту” в структуре растворителя энергетически выгодно. Как следствие энергия десольватации молекул М при перекрывании сольватных сфер будет небольшой. Гидратация М (см. табл. 4) слабее, чем сольватация в ЭГ. Поэтому величина  $h_{22}$  (М в H<sub>2</sub>O) менее отрицательна, чем  $h_{22}$  (М в ЭГ).

Весьма необычный факт наличия небольшой положительной величины  $h_{22}$  для М в ФА (см. табл. 3) подразумевает существование отличительных особенностей в характере молекулярных М – М-корреляций. Величина  $h_{22}$  в данном случае формально определяется доминированием энергии десольватации молекул М над энергией М – М-взаимодействия. Однозначный вывод о конфигурации (параллельная или антипараллельная) агрегатов М в формамиде сделать сложно. Результаты изучения раствора М в N,N-диметилформамиде (ДМФ) [27] более соответствуют антипараллельной конфигурации М – М. Но обобщить это на все растворы М в амидах можно с большой осторожностью, учитывая что для М в ДМФ  $h_{22} < 0$  [27].

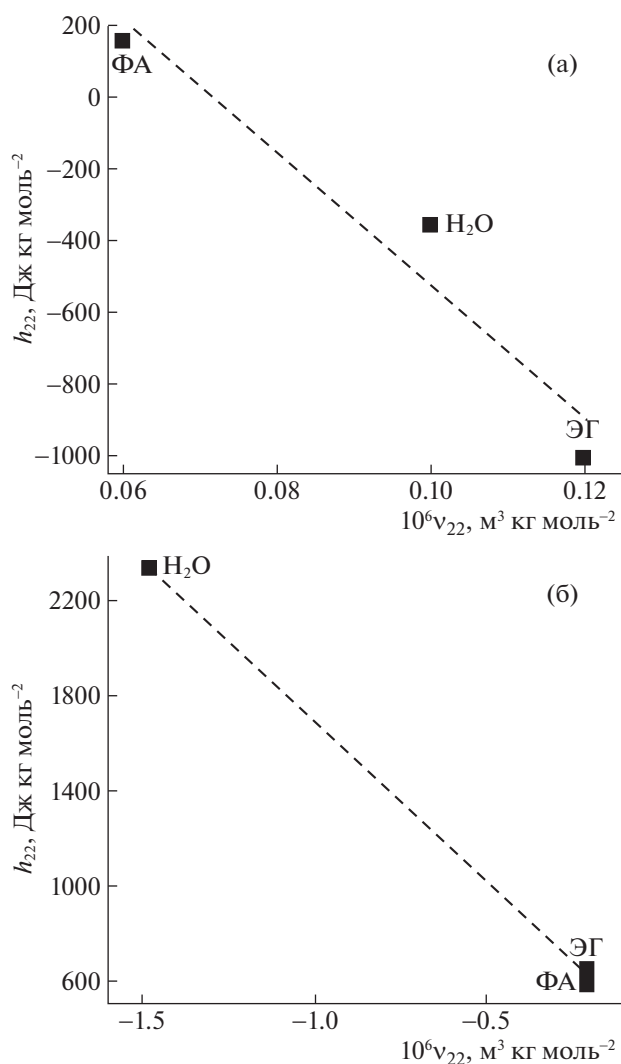
Учитывая сходство строения молекул М и ФА, можно сделать вывод о наличии комплементарности в ассоциированных посредством Н-связей

структурных матрицах растворителя (*in bulk*) и образующегося в нем сольватоконплекса М – ФА. В пользу этого свидетельствует то, что энтальпийные эффекты разведения растворов М в ФА весьма незначительны и слабо зависят от концентрации растворенного соединения (см. табл. 2). Как следствие, полученные нами и имеющиеся в литературе численные значения  $h_{22}$  для рассматриваемой системы тоже крайне невелики (см. табл. 3). Кроме того, объемный эффект растворения М в ФА близок к нулю [18, 28]. Такая ситуация “реализуется” в случае гидрофильных структуроупорядочивающих растворенных веществ [2, 25, 26, 29], т.е. когда  $g_{22} < 0$  и  $Ts_{22} > h_{22} > 0$  (здесь  $g_{22}$  и  $s_{22}$  – гиббсова и энтропийная составляющие энергии взаимодействия). К сожалению, в отсутствие данных по  $g_{22}$  и  $s_{22}$  мы можем сделать лишь формальное отнесение системы ФА + М к данной группе.

Изложенные выше обстоятельства предполагают наличие физически обоснованной корреляции между  $h_{22}$  и объемными параметрами парного 2–2-взаимодействия ( $v_{22}$ ) между сольватированными молекулами М или ТММ в растворителях рассматриваемого здесь ряда. Результаты построения таких корреляционных зависимостей по данным табл. 3 ( $h_{22}$ ) и заимствованным из работ [7, 16, 18, 27] значениям  $v_{22}$  изображены на рис. 1.

Результаты линейной аппроксимации представленных на рис. 1 данных (коэффициент корреляции ~0.93) подтверждают правомерность предположения о существовании взаимосвязи между термодинамическими (энергетическими  $h_{22}$  и структурно-упаковочными  $v_{22}$ ) параметрами парного взаимодействия между сольватированными молекулами М в жидких средах с пространственно-координированной сеткой Н-связей. Аналогичный вывод можно сделать и в отношении растворов ТММ в воде, ЭГ и ФА, с той лишь разницей, что в данном случае мы имеем дело фактически с простейшим (“двухцентровым”) корреляционным соотношением между  $h_{22}$  и  $v_{22}$ .

В заключение, обращаясь снова к данным табл. 3, констатируем, что совокупность полученных нами и имеющихся в литературе значений  $h_{22}$  не привела нас к каким-либо логичным умозаключениям относительно “природы” межмолекулярных взаимодействий в сравниваемых здесь растворах М и ТММ. Что касается основных



**Рис. 1.** Корреляционные соотношения между энтальпийными ( $h_{22}$ ) и объемными ( $v_{22}$ ) коэффициентами парного 2–2-взаимодействия в растворах мочевины (а) и тетраметилмочевины (б) при 298.15 К.

результатов обсуждения величин  $h_{22}$  из табл. 3, то, прежде всего, напрашивается вывод о важности учета конфигурационного фактора, связанного с взаимным расположением молекул в структурной упаковке образующегося раствора, при интерпретации эффектов межмолекулярного 2–2-взаимодействия в растворителях с пространственной сеткой водородных связей.

Авторы выражают признательность А.В. Кустову за оказанное консультативное содействие при интерпретации полученных экспериментальных и расчетных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 18-03-00016-а).

Подготовленные для опытов химпрепараты были протестированы на оборудовании “Верхневолжского регионального центра физико-химических исследований” (Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Franks F., Pedley M., Reid D.S. // J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1. 1976. V. 72. P. 359. <https://doi.org/10.1039/F19767200359>
2. Barone G., Cacace P., Castronuovo G., Elia V. // J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1. 1981. V. 77. P. 1569. <https://doi.org/10.1039/F19817701569>
3. Ivanov E.V., Batov D.V. // Thermochim. Acta. 2011. V. 523. P. 253. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.05.019>
4. Ivanov E.V., Batov D.V. // J. Chem. Thermodyn. 2016. V. 102. P. 9. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2016.06.020>
5. Ivanov E.V., Batov D.V. // J. Chem. Thermodyn. 2019. V. 128. P. 159. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2018.08.022>
6. Ivanov E.V., Kustov A.V., Batov D.V. et al. // J. Mol. Liq. 2020. V. 317. № 113994. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113994>
7. Kustov A.V., Ivanov E.V. // Advances in Thermodynamics Research / Ed. by J.A. Cobb. New York: Nova Science Publ., Inc., 2021. P. 75–130.
8. Абросимов В.К., Иванов Е.В., Батов Д.В. // Журн. физ. химии. 2006. Т. 80. № 11. С. 2016
9. Абросимов В.К., Иванов Е.В., Батов Д.Д. // Докл. АН. 2006. Т. 407. № 6. С. 785.
10. Родникова М.Н., Чумаевский Н.А. // Журн. структур. химии. 2006. Т. 47. № 7. С. S154.
11. Родникова М.Н. // Структурная самоорганизация в растворах и на границе раздела фаз / Под ред. А.Ю. Цивадзе. М.: Изд-во ЛКИ. 2008. С. 151–198.
12. Rodnikova M.N., Agayan G.M., Balabaev N.K. // J. Mol. Liq. 2019. V. 283. P. 374. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.03.090>
13. Kustov A.V., Smirnova N.L. // J. Phys. Chem. B. 2011. V. 115. № 49. P. 14551. <https://doi.org/10.1021/jp205331y>
14. Sedov I.A., Stolov M.A., Solomonov B.N. // J. Chem. Thermodyn. 2013. V. 64. P. 120. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2013.05.006>
15. Stolov M.A., Zaitseva K.V., Varfolomeev M.A., Acree W.E. // Thermochim. Acta. 2017. V. 648. P. 91. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2016.12.015>
16. Ivanov E.V., Kustov A.V., Lebedeva E.Yu. // J. Chem. Thermodyn. 2019. V. 135. P. 336. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2019.04.009>
17. Kustov A.V., Smirnova N.L., Antonova O.A. // J. Chem. Thermodyn. 2019. V. 130. P. 114. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2018.09.033>
18. Ivanov E.V., Kustov A.V., Lebedeva E.Yu. // J. Chem. Eng. Data. 2019. V. 64. № 12. P. 5886. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00794>
19. Кустов А.В., Батов Д.В., Усачева Т.Р. Калориметрия растворов неэлектролитов: теоретические ос-

- новы, эксперимент, анализ данных / Под ред. В.А. Шарнина. М.: Красанд, 2016. С. 33–53.
20. *McMillan W.G., Mayer J.E.* // *J. Chem. Phys.* 1945. V. 13. № 4. P. 276.  
<https://doi.org/10.1063/1.1668700>
21. *Hamilton D., Stokes R.H.* // *J. Sol. Chem.* 1972. V. 1. № 3. P. 223.  
<https://doi.org/10.1007/BF00645103>
22. *Franks F., Pedley M.D.* // *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1.* 1981. V. 77. P. 1341.  
<https://doi.org/10.1039/F19817701341>
23. *Kustov A.V., Smirnova N.L.* // *J. Chem. Eng. Data.* 2010. V. 55. № 9. P. 3055.  
<https://doi.org/10.1021/je9010689>
24. *Blokzijl W., Engberts J.B.F.N.* // *Angew. Chem., Int. Ed.* 1993. V. 32. № 11. P. 1545.  
<https://doi.org/10.1002/anie.199315451>
25. *Кесслер Ю.М., Зайцев А.Л.* Сольвофобные эффекты. Теория, эксперимент, практика. Л.: Химия, 1989. 312 с.
26. *Кустов А.В.* Гидрофобные эффекты: структурные, термодинамические, прикладные аспекты. Достижения последних лет. М.: Красанд. 2013. 224 с.
27. *Hamilton D., Stokes R.H.* // *J. Sol. Chem.* 1972. V. 1. № 3. P. 213.  
<https://doi.org/10.1007/BF00645102>
28. *Stokes R.H.* // *Australian J. Chem.* 1967. V. 20. P. 2087.  
<https://doi.org/10.1071/CH9672087>
29. *Wüzburger S., Sartorio R., Guarino G., Nisi M.* // *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1.* 1988. V. 84. P. 2279.  
<https://doi.org/10.1039/F19888402279>