

## ЭНЕРГИЯ ГИББСА ПЕРЕНОСА КРИПТАНДА[2.2.2] ИЗ ВОДЫ В ВОДНО-ЭТАНОЛЬНЫЙ РАСТВОРИТЕЛЬ

© 2024 г. В. А. Исаева<sup>а</sup>, \*, Е. И. Погодина<sup>а</sup>, А. С. Католикова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Ивановский государственный химико-технологический университет, 153000 Иваново, Россия

\*e-mail: kvol1969@gmail.com

Поступила в редакцию 26.02.2024 г.

После доработки 27.03.2024 г.

Принята к публикации 29.03.2024 г.

Методом межфазного распределения вещества между несмешивающимися фазами при температуре 298 К определены значения энергии Гиббса переноса криптанада[2.2.2] из воды в смешанный растворитель вода–этанол переменного состава. Установлено, что с ростом концентрации спирта в растворе происходит ослабление сольватации криптанада[2.2.2]. С использованием литературных данных рассчитаны значения энергии Гиббса переноса протонированного криптанада[2.2.2] и его комплексов с ионами никеля(II) и меди(II) из воды в водно-этанольные смеси.

**Ключевые слова:** криптан, сольватация, энергия Гиббса, водно-этанольный растворитель

**DOI:** 10.31857/S0044453724120034, **EDN:** EOUNSC

Неводные и водно-органические растворители как среда для проведения процессов находят широкое применение в различных областях химии и технологии [1–6]. Использование бинарных растворителей за счет варьирования их состава дает возможность подбора оптимальных условий протекания процессов [2–4, 7, 8]. Большое количество реакций, осуществляемых в растворах, относится к процессам комплексообразования [3, 9–11]. Определение индивидуальных термодинамических характеристик пересольватации участников жидкофазных реакций дает возможность установления взаимосвязи параметров сольватации и комплексообразования, выявления закономерностей, позволяющих прогнозировать изменение устойчивости комплексных соединений при замене растворителя [11–13].

Целью настоящей работы является определение значений энергии Гиббса переноса криптанада[2.2.2] из воды в водно-этанольные смеси переменного состава. Криптан-ды используются для селективного связывания ионов металлов в водных и неводных растворителях (в качестве экстрагентов для металлов, высокоселективных сорбентов, ионофоров, в электрохимии, для аналитического определения микрокомпонентов в природных и промышленных объектах [14–17]).

Криптан-д[2.2.2] представляет собой трехмерный макроцикл, узловые атомы азота которого соединены тремя оксиэтиленовыми цепочками, каждая из которых содержит два эфирных ато-

ма кислорода:  $N(CH_2CH_2OCH_2CH_2OCH_2CH_2)_3N$ . В литературе имеется набор данных об изменении энергии Гиббса переноса криптанада[2.2.2] из воды в индивидуальные органические растворители [18–20], процесс пересольватации криптанада[2.2.2] в водно-органических растворителях охарактеризован данными об изменении энергии Гиббса переноса этого макроцикла из воды в смеси вода–ацетонитрил [21].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для определения энергии Гиббса переноса криптанада[2.2.2] из воды в водно-этанольный растворитель использовали метод распределения частиц между двумя несмешивающимися фазами. В качестве неполярной фазы в настоящей работе был выбран гексан. При выборе неполярного растворителя, который не смешивался бы с водными растворами этанола, опирались на миксотропный ряд растворителей [22], а также данные работы [23], в которой проведен инструментальный контроль смешиваемости системы вода–этанол–гексан рефрактометрическим методом, на основании чего установлено, что гексан не смешивается с водно-этанольным растворителем в области концентраций этанола (EtOH) 0.0–0.5 мол. доли.

Определение энергии Гиббса переноса криптанада[2.2.2] из воды в водно-этанольный растворитель выполнено при температуре 298 К. Исходный водный (или водно-этанольный) раствор криптан-

да[2.2.2] готовили с концентрацией  $8 \times 10^{-3}$  моль/л ( $[\text{Cryp}]^{\text{исх}}$ ). Для проведения эксперимента в герметичную термостатируемую ячейку помещали равные аликвоты (по 10 мл) водного (или водно-этанольного) раствора криптанда[2.2.2] и гексана. В течение 8 ч проводили перемешивание с помощью магнитной мешалки. После отстаивания гетерогенной системы в течение 15 ч отбирали пробы (по 5 мл) верхнего (гексанового) и нижнего (водного (или водно-этанольного)) слоев.

Для расчета равновесной концентрации криптанда[2.2.2] в водной ( $[\text{Cryp}]^{\text{w}}$ ), водно-этанольных ( $[\text{Cryp}]^{\text{mix}}$ ) и гексановых ( $[\text{Cryp}]^{\text{hex}}$ ) пробах определяли его содержание гравиметрическим методом после выпаривания растворителя и высушивания сухого остатка до постоянной массы при температуре 338 К (так как температура плавления криптанда[2.2.2] составляет 341–345 К).

В связи с высокой летучестью гексана контролировали правильность экспериментального определения  $[\text{Cryp}]^{\text{hex}}$  расчетом этой величины по разности исходной концентрации криптанда[2.2.2] ( $[\text{Cryp}]^{\text{исх}}$ ) и равновесной в водном (или водно-этанольном) слое:

$$[\text{Cryp}]^{\text{hex}} = [\text{Cryp}]^{\text{исх}} - [\text{Cryp}]^{\text{w(mix)}}. \quad (1)$$

Единичный опыт считали успешным, если разница между значениями равновесной концентрации криптанда[2.2.2] в гексановом слое, определенной экспериментально по сухому остатку и рассчитанной по уравнению (1), не превышала  $2 \times 10^{-4}$  моль/л. Для расчета коэффициента распределения в данном опыте брали усредненное значение  $[\text{Cryp}]^{\text{hex}}$ .

Холостые опыты по выпариванию (по 5 мл) воды, водно-этанольных смесей и гексана показали отсутствие сухого остатка в растворителях. В каждой точке составов растворителя проводили не менее двух параллельных опытов.

В работе использовали криптан[2.2.2] (Merck KGaA, Германия, содержание основного компонента  $\geq 99\%$ ), воду (бидистиллят), гексан ("х.ч."), этанол ("ректификат"). Остаточное содержание воды в этаноле контролировали денсиметрически и учитывали при приготовлении растворов.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Константы распределения криптанда[2.2.2] между несмешивающимися фазами вода–гексан ( $k_1$ ) и водно-этанольный растворитель – гексан ( $k_2$ ) рассчитывали следующим образом:

$$k_1 = [\text{Cryp}]^{\text{hex}} / [\text{Cryp}]^{\text{w}}, \quad (2)$$

$$k_2 = [\text{Cryp}]^{\text{hex}} / [\text{Cryp}]^{\text{mix}}, \quad (3)$$

где  $[\text{Cryp}]^i$  – равновесная концентрация криптанда[2.2.2] в воде (w), водно-этанольном растворителе (mix) или гексане (hex).

Экспериментальную погрешность определения  $k_1$  и  $k_2$  оценивали, как частное отклонение отдельных измерений от среднего значения измеряемой величины, исходя из обработки результатов параллельных опытов.

Расчет энергий Гиббса переноса криптанда[2.2.2] из воды в водно-этанольный растворитель проводили по уравнению:

$$\Delta_{tr}G^\circ = RT \ln([\text{Cryp}]^{\text{w}} / [\text{Cryp}]^{\text{mix}}) = RT \ln(k_2 / k_1). \quad (4)$$

Полученные значения энергии Гиббса переноса криптанда[2.2.2] из воды в смеси вода–этанол принимали за стандартные значения, что связано с использованием низких концентраций криптанда[2.2.2] в растворах.

Погрешность величины  $\Delta G^\circ$  переноса криптанда[2.2.2] из воды в водно-этанольный растворитель рассчитали по формулам для нахождения погрешности косвенно определяемых величин [24].

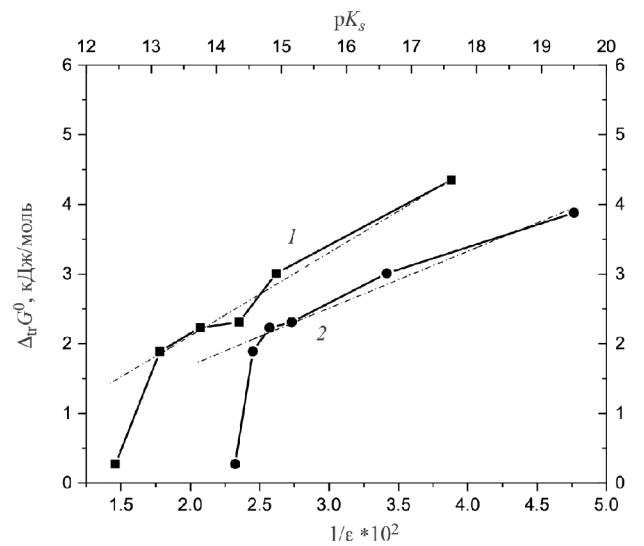
Значения констант распределения криптанда[2.2.2] между водой (водно-этанольным растворителем) и гексаном, рассчитанные по (2) и (3), приведены в табл. 1. Повышение численных значений констант распределения показывает, что с ростом содержания этанола в исходном растворе происходит увеличение концентрации криптанда[2.2.2] в слое гексана. Однако в целом величина  $k_2$  не превышает 0.232, т.е. в исследуемом концентрационном интервале EtOH большая часть криптанда[2.2.2] остается в водно-этанольном слое, что свидетельствует о термодинамической невыгодности переноса криптанда[2.2.2] из смешанного в безводный органический неполярный растворитель.

Величины энергии Гиббса переноса криптанда[2.2.2] из воды в водно-этанольные смеси, рассчитанные по константам распределения (уравнение 3), представлены в табл. 1. Собственные значения  $\Delta_{tr}G^\circ$  получены в интервале составов смешанного растворителя 0.0–0.5 мол. доли этанола. В табл. 1 также приведено значение энергии Гиббса переноса криптанда[2.2.2] из воды в этанол, полученное в работе [20], исходя из растворимости соли криптата натрия в воде и спирте с привлечением для расчета величины  $\Delta_{tr}G^\circ(\text{Cryp})$  значений  $\Delta_{tr}G^\circ$  катиона натрия и  $\Delta_{tr}G^\circ$  реакции комплексообразования.

Сольватирующую способность растворителя определяют его физико-химические свойства, такие как диэлектрическая проницаемость, склонность к автопротолизу, полярность, донорно-акцепторные числа и др. [11, 25–29]. Энергия Гиббса переноса криптанда[2.2.2] из воды

**Таблица 1.** Константы распределения криптана[2.2.2] между несмешивающимися фазами (вода–гексан ( $k_1$ ), водно-этанольный растворитель – гексан ( $k_2$ )) и энергия Гиббса переноса криптана[2.2.2] ( $\Delta_{tr}G^\circ$ , кДж/моль) из воды в водно-этанольный растворитель,  $T = 298\text{ K}$

$X_{\text{EtOH}}$ , мол. доли						
0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0
$k_1 \pm 0.029$	$k_2 \pm 0.042$					
0.069	0.077	0.148	0.170	0.175	0.232	
$\Delta_{tr}G^\circ \pm 1.2$						
0.0	0.3	1.9	2.2	2.3	3.0	4.35 [20]



**Рис. 1.** Корреляционные функции переноса криптана[2.2.2] из воды в водно-этанольный растворитель: 1 –  $\Delta_{tr}G^\circ(\text{Cryp}) = f(1/\epsilon)$ , 2 –  $\Delta_{tr}G^\circ(\text{Cryp}) = f(pK_s)$ .

в водно-этанольные смеси, в частности, хорошо коррелирует с изменением константы автопротолиза ( $pK_s$ ) [30] и диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$ ) [30] водно-этанольного растворителя (рис. 1). Отклонение от корреляционных зависимостей (линеаризованные зависимости  $\Delta_{tr}G^\circ(\text{Cryp}) = f(1/\epsilon)$  и  $\Delta_{tr}G^\circ(\text{Cryp}) = f(pK_s)$  показаны штрихпунктирной линией) наблюдается только для величины энергии Гиббса переноса криптана из воды в водно-этанольную смесь состава 0.1 мол. доли EtOH, но это отклонение не превышает заявленную погрешность определения  $\Delta_{tr}G^\circ(\text{Cryp})$ .

Сравнение энергии Гиббса переноса криптана[2.2.2] из воды в водно-этанольный растворитель с энергией Гиббса переноса прочих гетерофункциональных соединений показывает, что увеличение концентрации этанола в растворе может приводить как к росту, так и уменьшению величины  $\Delta_{tr}G^\circ$  в зависимости от типа соединения. Известно, что термодинамические параметры сольватации определяются вкладом функциональных групп растворенной молекулы [31–34]. Рассмотрение результатов ряда исследований показывает, что при переходе от воды к водно-этанольным смесям наблюдается усиление сольватации соединений, которые содержат ароматические фрагменты, нитрогруппы, амидные группы (нитроанилина [35], никотинамида [36], 2-амино-4,5-диметилтиофен-3-карбоксамида [37], ацетианофена [38], ванилина [39], бензойной кислоты [40], салициловой кислоты [41]) (рис. 2). Приведенные в работах [42–45] данные о растворимости аминокислот и пептидов в воде и водно-спиртовых смесях позволяют рассчитать энергию Гиббса переноса этих соединений из воды в водно-этанольный растворитель. Расчеты показывают, что перенос из воды в водно-этанольный растворитель алифатических соединений, содержащих карбоксильные и аминогруппы, характеризуется достаточно большим положительным значением  $\Delta_{tr}G^\circ$  (ациклических аминокислот (по данным [42–45]), линейных олигопептидов (по данным [44–46])) (рис. 2). Ароматические аминокислоты (фенилаланин (по данным [43, 44]), триптофан (по данным [43, 44])) демонстрируют существенно меньшее значение величины энергии Гиббса переноса их из воды в водно-этанольные смеси. Можно полагать, что основной вклад в упрочнение сольватного состояния алифатических аминокислот в водно-этанольных растворах вносит усиление сольватации по карбоксильной группе, поскольку величины  $\Delta_{tr}G^\circ$  этих аминокислот сопоставимы с величиной  $\Delta_{tr}G^\circ$  уксусной кислоты [47] и значительно превышают величину  $\Delta_{tr}G^\circ$  аммиака [48] (рис. 2). При рассмотрении энергии Гиббса переноса криптана[2.2.2] из воды в водно-этанольный растворитель не наблюдается определяющего вклада в изменение сольватного состояния макроцикла процессов пересольватации определенных функциональных фрагментов (третичного азота, либо оксиэтиленовых цепочек). Об этом косвенно можно судить по соизмеримым значениям  $\Delta_{tr}G^\circ$  аммиака [48] и  $\Delta_{tr}G^\circ$  18-краун-6-эфира [49] (рис. 2), при этом данные величины не превышают величину  $\Delta_{tr}G^\circ$  криптана[2.2.2].

При рассмотрении процессов сольватации трехмерных макроциклов и их соединений с катионами металлов зачастую используют “криптанное допущение”, основанное на предположении о равенстве термодинамических характеристик

пересольватации криптанда и его комплекса в неводных и смешанных растворителях [19, 50–52]. Предположение находит подтверждение для процессов формирования комплексов криптантов с большинством одновалентных ионов [50–52]. Образование протонированного криптанда[2.2.2] также связано с включением катиона внутрь макроциклической полости [53]. Имеющиеся данные о константах протонирования криптанда[2.2.2] в водно-этанольной среде [54] и значения  $\Delta_{tr}G^\circ$  переноса протона в растворитель вода–этанол [55] позволяют рассчитать энергию Гиббса переноса монопротонированного криптанда[2.2.2]:

$$\Delta_{tr}G_r^\circ = -2.303RT(\lg K^{\text{mix}} - \lg K^w), \quad (5)$$

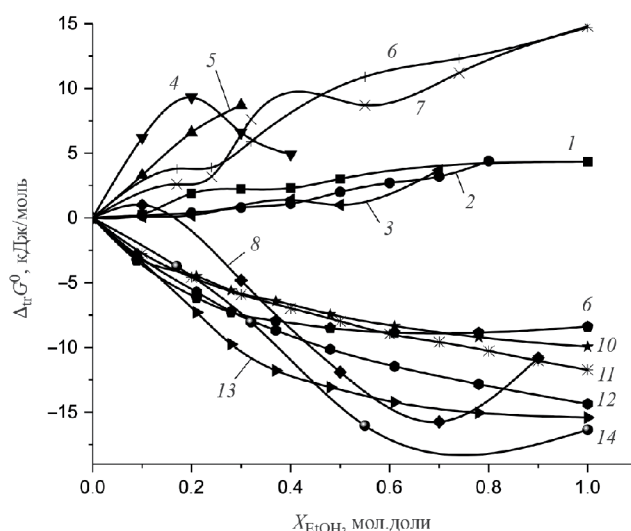
$$\begin{aligned} \Delta_{tr}G_r^\circ &= \Delta_{tr}G^\circ([\text{HCryp}]^+) - \\ &- \Delta_{tr}G^\circ(\text{Cryp}) - \Delta_{tr}G^\circ(\text{H}^+), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\lg K^{\text{mix}}$  и  $\lg K^w$  — константы протонирования криптанда[2.2.2] в водно-этанольном и водном растворах соответственно.

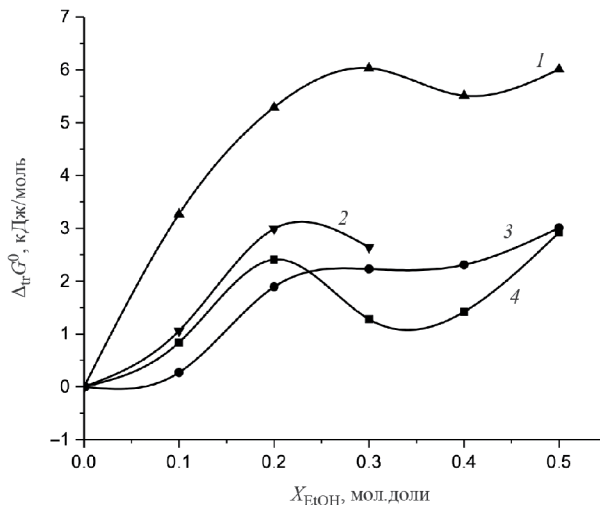
Результаты расчетов показывают, что экранирование протона полостью макроцикла от растворителя определяет близкое значение величин  $\Delta G^\circ$  переноса свободного и протонированного криптанда[2.2.2] из воды в водно-этанольные смеси (рис. 3).

Включение внутрь макроциклической полости двухвалентных катионов требует больших структурных изменений макроцикла [50, 56], что в некоторых случаях приводит к значительным отклонениям от “криптанного допущения” [50]. К тому же, несмотря на локализацию катиона металла в макроциклической полости при комплексообразовании, сохраняется его частичная доступность для сольватации [50, 51, 56]. Расчет энергии Гиббса переноса моноядерных комплексов криптанда[2.2.2] с катионами меди(II) и никеля(II) из воды в растворитель вода–этанол можно провести по уравнениям, аналогичным (5) и (6), с использованием известных значений  $\Delta_{tr}G^\circ(\text{Cu}^{2+})$  [55],  $\Delta_{tr}G^\circ(\text{Ni}^{2+})$  [57] и констант образования криптантов с данными металлами в водно-этанольных растворах [57, 58]. Расчеты показывают (рис. 3), что в водно-этанольных растворах различие в сольватации криптанда[2.2.2] и его комплексных ионов с двухвалентными металлами  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$ , характеризующееся величиной  $\Delta_{tr}G^\circ$ , может достигать 4 кДж/моль.

Таким образом, в настоящей работе установлено, что в водно-этанольных смесях увеличение концентрации спирта приводит к ослаблению сольватации криптанда[2.2.2]. Экспериментально полученные результаты, а также определенные на их основе расчетные величины дополняют



**Рис. 2.** Энергия Гиббса переноса из воды в водно-этанольный растворитель: 1 — криптанда[2.2.2], 2 — аммиака [48], 3 — 18-краун-6 эфира [49], 4 — уксусной кислоты [47], 5 — глицилглицина [46], 6 — α-аланина [42], 7 — глицина [42], 8 — никотинамида [36], 9 — ацетаминофена [38], 10 — ванилина [39], 11 — п-нитроанилина [35], 12 — бензойной кислоты [40], 13 — салициловой кислоты [41], 14 — 2-амино-4,5-диметилтиофен-3-карбоксамида [37].



**Рис. 3.** Энергия Гиббса переноса из воды в водно-этанольный растворитель: 1 —  $[\text{NiCryp}]^{2+}$ , 2 —  $[\text{CuCryp}]^{2+}$ , 3 — криптанда[2.2.2], 4 —  $[\text{HCryp}]^+$ .

справочные данные по термодинамическим свойствам криптантов.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zaretskii M.I., Rusak V.V., Chartov E.M. // *Coke Chem.* 2009. V. 52. № 2. P. 83.  
DOI:10.3103/S1068364X09020070
2. Zuorro A., Iannone A., Lavecchia R. // *Process.* 2019. V. 7. № 3. P. 126.  
DOI:10.3390/pr7030126
3. Тележкина А.В., Жуликов В.В., Душик В.В., и др. // *Гальванотехника и обработка поверхности.* 2021. Т. 29. № 4. С. 29.
4. Беляева А.В., Смирнова Ю.А., Лысогорская Е.Н., и др. // *Биоорган. химия.* 2008. Т. 34. № 4. С. 487.  
[Belyaeva A.V., Lozinskii V.I., Smirnova Yu.A., et al. // *Russ. J. Bioorg. Chem.* 2008. Т. 34. № 4. С. 435.  
DOI: 10.1134/S1068162008040079]
5. Басок С.С., Кулыгина Е.Ю., Богащенко Т.Ю., Яковенко И.С. // *Макрогетероциклы.* 2021. Т. 14. № 3. С. 221.  
DOI: 10.6060/mhc200609k
6. Baghalabadi V., Razmi H., Doucette A. // *Proteomes.* 2021. V. 9. P. 44.  
<https://doi.org/10.3390/proteomes9040044>
7. Liao L., Jia X., Lou H., et al. // *RSC Adv.* 2021. V. 11. P. 11519.  
DOI: 10.1039/D1RA00647A
8. Zou T., Nonappa N., Khavani M., et al. // *J. Phys. Chem. B.* 2021. V. 125. P. 12315. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c05319>
9. Гибадуллина Х.В. // *Научн. исследов. XXI века.* 2020. Т. 2. № 4. С. 11.
10. Звездина С.В., Чижова Н.В., Мамардашвили Н.Ж., Койфман О.И. // *Макрогетероциклы.* 2022. Т. 15. № 2. С. 101.  
DOI: 10.6060/mhc224315m
11. Трубочев А.В., Трубочева Л.В. *Минерально-органические растворители в вольтамперометрии металлов: монография.* Ижевск: Изд. центр “Удмуртский университет”, 2018. 224 с.
12. Maldonado A.M., Basdogan Y., Berryman J.T., et al. // *J. Chem. Phys.* 2020. V. 152. P. 130902.  
<https://doi.org/10.1063/1.5143207>
13. Elango K.P. // *J. Chem. Research.* 2004. P. 794.  
<https://doi.org/10.3184/0308234043431375>
14. Bento M.A., Realista S., Viana A.S., et al. // *Sustainability.* 2021. V. 13. P. 4158.  
<https://doi.org/10.3390/su13084158>
15. Salman A.D., Juzsakova T., Jalhoom M.G., et al. // *Materials.* 2020. V. 13. P. 5727.  
doi:10.3390/ma13245727
16. Mathew A., Parambadath S., Barnabas M.J., et al. // *Micropor. Mesopor. Materials.* 2017. V. 238. P. 27.  
10.1016/j.micromeso.2016.04.033
17. Tapia L., Alfonso I., Sola J. // *Org. Biomolec. Chem.* 2021. V. 19. № 44. P. 9527.  
<https://doi.org/10.1039/d1ob01737c>
18. Abraham M.H., Ling H.C. // *J. Chem. Soc. Farad. Trans. I.* 1984. V. 80. P. 3445.  
<https://doi.org/10.1039/F19848003445>
19. Marcus Y. // *Rev. Anal. Chem.* 2004. V. 23. № 4. P. 269.  
<https://doi.org/10.1515/REVAC.2004.23.4.269>
20. Namor A.F.D., de Ponce H.B., Viguria E.C. // *J. Chem. Soc. Farad. Trans. I.* 1986. V. 82. P. 2811.  
<https://doi.org/10.1039/F19868202811>
21. Cox B.G., Schneider H. // *Pure Appl. Chem.* 1989. V. 61. P. 171.  
<https://doi.org/10.1351/pac198961020171>
22. Рудаков О.Б., Востров И.А., Федоров С.В., и др. *Спутник хроматографиста. Методы жидкостной хроматографии.* Воронеж: Изд-во “Водолей”, 2004. 528 с.
23. Граждан К.В., Гамов Г.А., Душина С.В., Шарнин В.А. // *Журн. физ. химии.* 2012. Т. 86. № 11. С. 1802.  
[Grazhdan K.V., Gamov G.A., Dushina S.V., Sharnin V.A. // *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2012. Т. 86. № 11. P. 1679.  
DOI: 10.1134/S0036024412110131]
24. Аксенова Е.Н. *Элементарные способы оценки погрешностей результатов прямых и косвенных измерений.* М.: МИФИ, 2003—16 с.
25. Чувев Г.Н., Базилевский М.В. // *Успехи химии.* 2003. Т. 72. № 9. С. 827.
26. Соломинова Т.С., Сапожников Ю.Е., Колбин А.М., и др. // *Башкирск. химич. журн.* 2010. Т. 17. № 2. С. 54.
27. Xue M., Huang D.-Z., Yang K.-X., et al. // *J. Molecul. Liquids.* 2021. V. 330. P. 115639.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115639>
28. Танганов Б.Б., Могнонов Д.М. // *Изв. вузов. Прикладн. химия и биотехнолог.* 2019. Т. 9. № 4. С. 612.  
<https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-612-620>
29. Doluia B.K., Bhattacharya S.K., Kundu K.K. // *Ind. J. Chem.* 2007. V. 46A. P. 1081.  
<http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/1218>
30. Kiani F., Bahadori A., Sharifi S et al. // *Europ. Online J. Natur. Social Scienc.* 2013. V. 2. № 1. P. 140.  
<http://www.european-science.com>
31. Jimenez-Gravalos F., Diaz N., Francisco E., et al. // *Chem. Phys. Chem.* 2018. V. 19. № 24. P. 3425.  
DOI: 10.1002/cphc.201800733
32. Chung Y., Vermeire F.H., Wu H., et al. // *J. Chem. Inf. Model.* 2022. V. 62. № 3. P. 433.  
<https://doi.org/10.1021/acs.jcim.1c01103>
33. Tomar D.S., Asthagiri D., Weber V. // *Biophysic. J.* 2013. V. 105. № 6. P. 1482.  
doi: 10.1016/j.bpj.2013.08.011
34. Soterias I., Orozco M., Javier L.F. // *Brazil. J. Phys.* 2004. V. 34. № 1. P. 48.  
DOI: 10.1590/S0103-97332004000100008

35. Akay S., Kayan B., Martinez F. // Phys. Chem. Liquids. 2021. V. 59. № 6. P. 956.  
<https://doi.org/10.1080/00319104.2021.1888095>
36. Зевакин М.А., Граждан К.В., Душина С.В., Шарнин В.А. // Журн. физ. химии. 2006. Т. 80. № 8. С. 1445.  
[Zevakin M.A., Grazhdan K.V., Dushina S.V., Sharnin V.A. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2006. V. 80. № 8. P. 1269.  
DOI: 10.1134/S0036024406080176]
37. Goma E.A., Berghota M.A., Moustafab M.R., et al. // Progress Chem. Biochem. Research. 2018. V. 1. № 1. P. 19.
38. Delgado D.R., Pena M.A., Martinez F. // Rev. Colomb. Cienc. Quim. Farm. 2013. V. 42. № 2. P. 298.
39. Akay S., Kayan B., Jouynban B., et al. // J. Molecul. Liquids. 2021. V. 342. P. 117529.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117529>
40. Akay S., Kayan B., Pena M.A., et al. // Reactions. 2022. V. 3. P. 392.  
<https://doi.org/10.3390/reactions3030028>
41. Akay S., Kayan B., Pena M.A., et al. // Intern. J. Thermophys. 2023. V. 44. P. 120.  
<https://doi.org/10.1007/s10765-023-03224-z>
42. Dey B.P., Lahiri S.C. // Indian J. Chem. 1986. V. 25A. № 2. P. 136.
43. Bowden N.A., Sanders J.P.M., Bruins M.E. // J. Chem. Eng. Data. 2018. V. 63. P. 488.  
DOI: 10.1021/acs.jced.7b00486
44. Nozaki Y., Tanford C. // J. Biolog. Chem. 1971. V. 246. № 7. P. 2211.
45. Lu J., Wang X.-J., Yang X., Ching C.-B. // Ibid. 2006. V. 51. № 5. 1593. 10.1021/je0600754
46. Исаева В.А., Молчанов А.С., Кипятков К.А., Шарнин В.А. // Журн. физ. химии. 2020. Т. 94. № 1. С. 16.  
DOI: 10.31857/S0044453720010100  
[Isaeva V.A., Sharnin V.A., Molchanov A.S., Kipyatkov K.A. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2020. V. 94. № 1. С. 13.  
DOI: 10.1134/S0036024420010100]
47. Исаева В.А., Шарнин В.А., Шорманов В.А. // Там же. 1997. Т. 71. № 8. С. 1371.  
[Isaeva V.A., Sharnin V.A., Shormanov V.A. // Ibid. 1997. V. 71. № 8. P. 1226.]
48. Невский А.В., Шорманов В.А., Крестов Г.А. // Там же. 1984. Т. 58. № 1. С. 97.
49. Усачева Т.Р., Кузьмина И.А., Джумашева М.О. и др. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2010. Т. 53. № 12. С. 51.
50. Cox B.G., Stroka J., Schneider I., Schneider H. // J. Chem. Soc. Farad. Trans. I. 1989. V. 85. № 2. P. 187.  
<https://doi.org/10.1039/F19898500187>
51. Chantoni M.K., Kolthoff I.M. // J. Solut. Shem. 1985. V. 14. № 1. P. 1.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00646725>
52. Cox B.G., Garsia-Rosas J., Schneider H. // J. Am. Chem. Soc. 1981. V. 103. № 6. P. 1384.  
<https://doi.org/10.1021/ja00396a016>
53. Исаева В.А., Гамов Г.А., Шарнин В.А. // Журн. физ. химии. 2022. Т. 96. № 5. С. 687.  
DOI: 10.31857/S0044453722050132  
[Isaeva V.A., Gamov G.A., Sharnin V.A. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2022. V. 96. № 5. С. 1004.  
DOI: 10.1134/S0036024422050132]
54. Исаева В.А., Шарнин В.А. // Там же. 2018. Т. 92. № 4. С. 600.  
DOI: 10.7868/S0044453718040131  
[Isaeva V.A., Sharnin V.A. // Ibid. 2018. V. 92. № 4. С. 710.  
DOI: 10.1134/S0036024418040088]
55. Kalidas C., Hefter G., Marcus Y. // Chem. Rev. 2000. V. 100. № 3. P. 819.  
<https://doi.org/10.1021/cr980144k>
56. Исаева В.А., Гамов Г.А., Католикова А.С., Погодина Е.И. // Журн. общ. химии. 2023. Т. 93. № 1. С. 126.  
DOI: 10.31857/S0044460X23010146  
[Isaeva V.A., Gamov G.A., Katolikova A.S., Pogodina E.I. // Russ. J. Gener. Chem. 2023. V. 93. № 1. P. 56.  
DOI: 10.1134/S1070363223010085]
57. Исаева В.А., Погодина Е.И., Католикова А.С., Шарнин В.А. // Журн. физ. химии. 2023. Т. 97. № 4. С. 505.  
DOI: 10.31857/S0044453723040155  
[Isaeva V.A., Katolikova A.S., Pogodina E.I., Sharnin V.A. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2023. V. 97. № 4. С. 651.  
DOI: 10.1134/S0036024423040143]
58. Исаева В.А., Кипятков К.А., Гамов Г.А., Шарнин В.А. // Там же. 2021. Т. 95. № 5. С. 758.  
DOI: 10.31857/S0044453721050162  
[Isaeva V.A., Kipyatkov K.A., Gamov G.A., Sharnin V.A. // Ibid. 2021. V. 95. № 5. С. 968.  
DOI: 10.1134/S0036024421050162]