

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

© 2024 г. В.А. Исаева^a, *, Е.И. Погодина^a, А.С. Католикова^a

^aИвановский 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 криптанда[2.2.2] из воды в смешанный растворитель вода–этанол переменного состава. Установлено, что с ростом концентрации спирта в растворе происходит ослабление сольватации криптанда[2.2.2]. С использованием литературных данных рассчитаны значения энергии Гиббса переноса протонированного криптанда[2.2.2] и его комплексов с ионами никеля(II) и меди(II) из воды в водно-этанольные смеси.

Ключевые слова: криптанд, 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 криптанда[2.2.2] из воды в водно-этанольные смеси переменного состава. Криптанды 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]).

Криптанд[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 криптанда[2.2.2] из воды в индивидуальные органические растворители [18–20], процесс пересольватации криптанда[2.2.2] в водно-органических растворителях охарактеризован данными об изменении энергии Гиббса переноса этого макроцикла из воды в смеси вода–акетонитрил [21].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для определения энергии Гиббса переноса криптанда[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 криптанда[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 8×10^{-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 ($[\text{Cryp}]^w$), 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 338К (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:

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

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 2×10^{-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 криптанд[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:

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

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

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:

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

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 ΔG° 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 $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ 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 $\Delta_{\text{tr}}G^\circ(\text{Cryp})$ значений $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ катиона натрия и $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ 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 криптанда[2.2.2] между несмешивающимися фазами (вода–гексан (k_1), водно-этанольный растворитель – гексан (k_2)) и энергия Гиббса переноса криптанда[2.2.2] ($\Delta_{\text{tr}}G^\circ$, кДж/моль) из воды в водно-этанольный растворитель, $T = 298$ К

X_{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	
$\Delta_{\text{tr}}G^\circ \pm 1.2$						
0.0	0.3	1.9	2.2	2.3	3.0	4.35 [20]

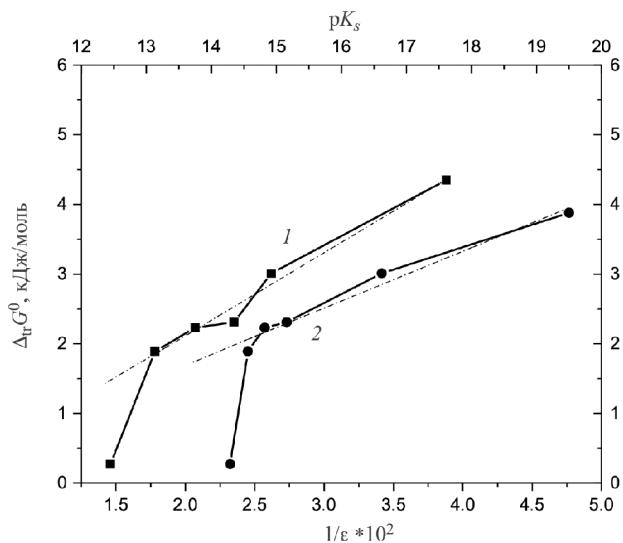


Рис. 1. Корреляционные функции переноса криптанда[2.2.2] из воды в водно-этанольный растворитель: 1 – $\Delta_{\text{tr}}G^\circ(\text{Стур}) = f(1/\epsilon)$, 2 – $\Delta_{\text{tr}}G^\circ(\text{Стур}) = f(pK_s)$.

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

Сравнение энергии Гиббса переноса криптанда[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 $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ 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], ацетаминофена [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 $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ (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 $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ этих аминокислот сопоставимы с величиной $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ уксусной кислоты [47] и значительно превышают величину $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ амиака [48] (рис. 2). При рассмотрении энергии Гиббса переноса криптанда[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 $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ амиака [48] и $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ 18-краун-6-эфира [49] (рис. 2), при этом данные величины не превышают величину $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ криптанда[2.2.2].

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

пересольватации криптанда и его комплекса в нейтральных и смешанных растворителях [19, 50–52]. Предположение находит подтверждение для процессов формирования комплексов криптандов 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-этанольных средах [54] и значения $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ переноса протона в растворитель вода–этанол [55] позволяют рассчитать энергию Гиббса переноса монопротонированного криптанда[2.2.2]:

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

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

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 ΔG° 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 $\Delta_{\text{tr}}G^\circ(\text{Cu}^{2+})$ [55], $\Delta_{\text{tr}}G^\circ(\text{Ni}^{2+})$ [57] и констант образования криптантов с различными 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 Cu^{2+} и Ni^{2+} , характеризуемое величиной $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$, 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

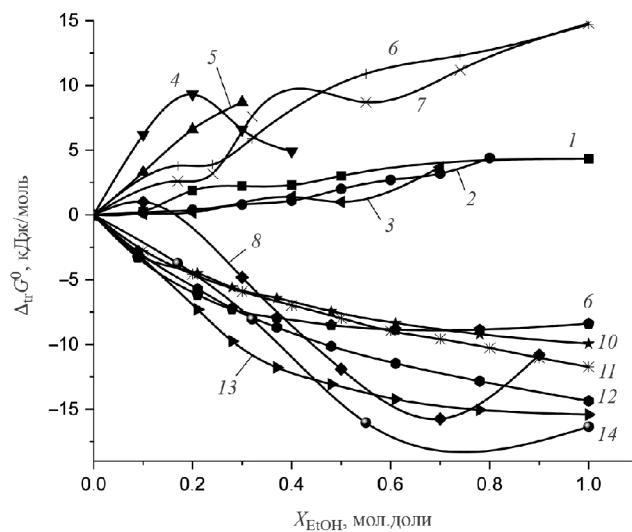


Рис. 2. Энергия Гиббса переноса из воды в водно-этанольный растворитель: 1 – криптанда[2.2.2], 2 – аммиака [48], 3 – 18-краун-6 эфира [49], 4 – уксусной кислоты [47], 5 – глицилглицина [46], 6 – α -аланина [42], 7 – глицина [42], 8 – никотинамида [36], 9 – ацетаминофена [38], 10 – ванилина [39], 11 –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

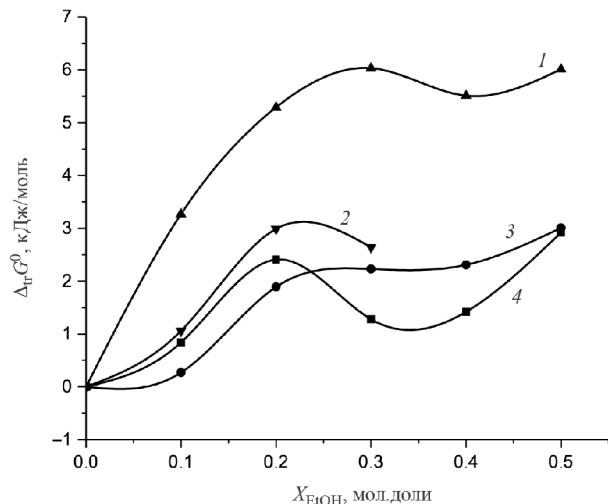


Рис. 3. Энергия Гиббса переноса из воды в водно-этанольный растворитель: 1 – $[\text{NiCryp}]^{2+}$, 2 – $[\text{CuCryp}]^{2+}$, 3 – криптанда[2.2.2], 4 – $[\text{HCryp}]^+$.

справочные данные по термодинамическим свойствам криптандов.

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. T. 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.jpcb.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. Трубачев А.В., Трубачева 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. Biomol. 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., Sharinin V.A. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2012. T. 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. Чуев 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., Могнолов 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. Dolua B.K., Bhattacharya S.K., Kundu K.K. // Ind. J. Chem. 2007. V. 46A. P. 1081.
<http://nopr.nscpr.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. Soteras 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. Gomaa 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. Р. 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]