

УДК 544.332.031:544.362.032.732

ЭНТАЛЬПИИ КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ РАВНОВЕСИЙ В ВОДНО-ЭТАНОЛЬНЫХ РАСТВОРАХ АМИНОКИСЛОТ И ПЕПТИДОВ: РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТ

© 2022 г. В. А. Исаева^{а,*}, В. А. Шарнин^а^а Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия

*e-mail: kvol1969@gmail.com

Поступила в редакцию 13.10.2021 г.

После доработки 13.10.2021 г.

Принята к публикации 14.10.2021 г.

Рассмотрена возможность использования значений термодинамических функций переноса реагентов и продуктов реакции из воды в водно-органический растворитель для расчета изменения термодинамических параметров реакций в этих средах. На основании термодинамического цикла рассчитаны значения изменения энтальпии реакций диссоциации глицина, β-аланина, L-α-фенилаланина и глицил-глицина в водных растворах этанола с различным содержанием спирта. Расчетные значения энтальпии реакции диссоциации глицина и β-аланина сопоставлены с полученными экспериментально-калориметрическим методом при хорошей сходимости результатов. При обобщении результатов настоящей работы и имеющихся литературных данных показан схожий характер влияния концентрации этанола в растворе на изменение величины теплового эффекта процесса диссоциации как катионных, так и незаряженных кислот. Установлено, что изменение энтальпии реакций диссоциации аминокислот и глицилглицина вносит основной вклад в изменение энергии Гиббса этих процессов в водно-этанольном растворе.

Ключевые слова: реакция диссоциации, глицин, β-аланин, L-α-фенилаланин, глицил-глицин, изменение энтальпии, водно-этанольный растворитель

DOI: 10.31857/S0044453722040112

Как неводные растворители, так и смешанные на их основе, широко используются наряду с водными системами для практических целей. Выбор среды для протекания реакции позволяет в широких пределах изменять ее термодинамические параметры (ΔG_r° , ΔH_r° , $T\Delta S_r^\circ$) [1]. Константы равновесия и тепловые эффекты реакций в растворах могут быть определены экспериментально с высокой точностью. Набор экспериментально полученных термодинамических параметров процессов может быть дополнен рассчитанными из значений термодинамических параметров переноса частиц из воды в водно-органические растворители. В настоящей работе расчетный способ использован для нахождения значений энтальпий реакций диссоциации глицина, β-аланина, L-α-фенилаланина и глицил-глицина в водных растворах этанола. Изучение кислотно-основных свойств лигандов в водно-органических растворах — необходимое условие корректной интерпретации термодинамических характеристик реакций комплексообразования в этих же средах, а также представляет самостоятельный интерес для

установления закономерностей влияния растворителя на смещение протолитических равновесий.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТ

Значения изменения энтальпии реакций ($\Delta_{tr}H_r^\circ$) кислотной диссоциации цвиттер-ионов (HL^\pm) глицина, β-аланина, L-α-фенилаланина и глицил-глицина в водных растворах этанола (EtOH) с переменной концентрацией спирта рассчитывали по уравнению:

$$\Delta_{tr}H_r^\circ = \Delta_{tr}H^\circ(\text{L}^-) + \Delta_{tr}H^\circ(\text{H}^+) - \Delta_{tr}H^\circ(\text{HL}^\pm). \quad (1)$$

Значения энтальпии переноса протона из воды в водно-этанольный растворитель взяты из работы [2]. Изменение энтальпии переноса из воды в растворитель вода—этанол глицинат-иона и глицил-глицинат-иона определено в работах [3] и [4] соответственно на основе измерения тепловых эффектов смешения водных растворов глицината натрия (глицил-глицината натрия) с водно-этанольным растворителем с последующим делением полученных значений энтальпий переноса

Таблица 1. Энтальпии реакций диссоциации глицина, β -аланина, L- α -фенилаланина и глицил-глицина в водном растворе при 298 К

ΔH_r , кДж/моль	Условия	Источник
$HG^\pm \rightleftharpoons G^- + H^+$		
44.0	$\mu \rightarrow 0.0$	[16]
43.3	$\mu = 0.1 \text{ M (NaClO}_4)$	[12]
44.2	$\mu = 0.3 \text{ M (NaClO}_4)$	[17]
$\beta\text{-HAla}^\pm \rightleftharpoons \beta\text{-Ala}^- + H^+$		
46.8	$\mu \rightarrow 0.0$	[18]
47.5	$\mu \rightarrow 0.0$	[19]
46.9	$\mu \rightarrow 0.0$	[20]
46.1	$\mu \rightarrow 0.0$	[13]
$L\text{-}\alpha\text{-HPh}^\pm \rightleftharpoons L\text{-}\alpha\text{-Phe}^- + H^+$		
44.84	$\mu \rightarrow 0.0$	[14]
45.56	$\mu \rightarrow 0.0$	[21]
42.0	$\mu \rightarrow 0.0$	[18]
43.1	$\mu \rightarrow 0.0$	[22]
44.64	$\mu = 0.1 \text{ M (KCl)}$	[23]
44.6	$\mu = 0.2 \text{ M (NaCl)}$	[24]
$HGG^\pm \rightleftharpoons GG^- + H^+$		
43.4	$\mu \rightarrow 0.0$	[25]
44.29	$\mu \rightarrow 0.0$	[26]
42.93	$\mu \rightarrow 0.0$	[27]
44.3	$\mu = 0.1 \text{ M (NaClO}_4)$	[15]
44.3	$\mu = 0.20 \text{ M (KCl)}$	[28]

NaL на ионные составляющие. Значения энтальпий переноса анионов β -аланина и L- α -фенилаланина рассчитали, используя значения энтальпий переноса из воды в водно-этанольный растворитель β -аланината натрия [5], L- α -фенилаланината натрия [6] и иона Na^+ [2]. Значения энтальпий переноса глицина (HG^\pm) рассчитывали, исходя из данных [7] по тепловым эффектам растворения аминокислоты в воде и водно-этанольном растворителе различного состава. Данные об энтальпиях переноса в водно-этанольные смеси β -аланина ($\beta\text{-HAla}^\pm$) и L- α -фенилаланина ($L\text{-}\alpha\text{-HPh}^\pm$) взяты из работ [8] и [9]. Величины изменения энтальпии переноса глицил-глицина (HGG^\pm) рассчитывали на основе энтальпий растворения пептида в воде [10] и в водно-этанольном растворителе [11]. Значения энтальпий растворения частиц, приведенные в работах [2–11], определены при температуре 298 К. Энтальпии переноса частиц из воды в водно-этанольные смеси, взятые из работ [5–9, 11], пересчитывали для содержания спирта в растворе в мольных долях методом интерполяции.

Используя полученные по уравнению (1) значения функций переноса $\Delta_{tr}H_r^\circ$ из воды в водно-этанольные смеси и значения энтальпий реакций диссоциации глицина [12], β -аланина [13], L- α -фенилаланина [14] и глицилглицина [15] в водных растворах, рассчитали значения энтальпий изучаемых реакций в водных растворах этанола переменного состава. При этом исходили из допущения, что изменение термодинамических параметров реакций при переходе от воды к водно-органическим смесям от ионной силы растворов зависит незначительно ($\Delta_{tr}H_r^\circ = \Delta_{tr}H_r$). Соответственно, полученные величины энтальпий реакций диссоциации глицина и глицил-глицина в водных растворах этанола отнесены к той ионной силе, при которой определены тепловые эффекты реакций диссоциации в водном растворе. Основанием правомочности такого допущения служит сопоставление полученных при разных условиях энтальпий реакций диссоциации аминокислот и глицил-глицина, показывающее отсутствие заметной зависимости ΔH_r от ионности среды в области низких значений ионной силы растворов ($\mu = 0.0\text{--}0.3 \text{ M}$) (табл. 1).

Экспериментальное определение тепловых эффектов реакции диссоциации глицина в водных и водно-этанольных растворах при ионной силе растворов 0.1 М ($NaClO_4$) и температуре 298 К выполнено нами ранее на прецизионном ампульном калориметре с изотермической оболочкой, как описано в работе [12]. Экспериментальные значения энтальпии реакции диссоциации глицина в водно-этанольных смесях, отнесенные к нулевой ионной силе растворов и температуре 298 К, получены авторами [16]. Для процесса диссоциации β -аланина значения энтальпии при температуре 298 К и $\mu \rightarrow 0.0$ определены, исходя из температурной зависимости константы равновесия реакции, полученной потенциометрическим методом, и приведены в работе [13].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В водных растворах глицин, β -аланин, L- α -фенилаланин и глицил-глицин существуют в виде биполярных цвиттер-ионов, диссоциация которых идет по аминогруппе:

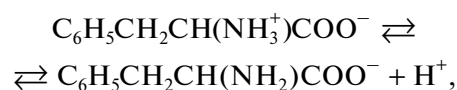
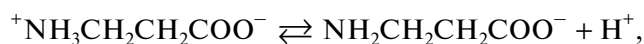
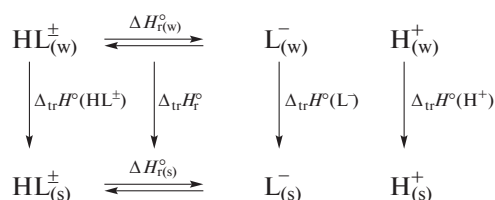


Таблица 2. Изменение энтальпии (ΔH_r , кДж/моль) реакций диссоциации глицина, β -аланина, L- α -фенилаланина и глицил-глицина в водно-этанольных растворах при 298 К и значениях X_{EtOH} от 0 до 0.6 мол.доли (μ – ионная сила (NaClO_4))

Метод	0.00	0.05	0.089	0.10	0.20	0.207	0.25	0.30	0.37	0.40	0.50	0.6	μ
$\text{HG}^\pm \rightleftharpoons \text{G}^- + \text{H}^+$													
Расчет	43.3	45.1		45.2	43.0			37.4					0.1M
Эксперимент [12]	43.3	46.1		47.1	44.3			41.3		40.9			0.1M
Эксперимент [16]	44.0	46.5		45.7	42.8			41.2					→ 0.0
$\beta\text{-HAla}^\pm \rightleftharpoons \beta\text{-Ala}^- + \text{H}^+$													
Расчет	46.1	49.5		48.6	42.6			38.4					→ 0.0
Эксперимент [13]	46.1		48.0			40.8			32.2				→ 0.0
$\text{L-}\alpha\text{-HPh}^\pm \rightleftharpoons \text{L-}\alpha\text{-Phe}^- + \text{H}^+$													
Расчет	44.8	56.8		63.9	55.1			45.8		40.7	34.0	22.4	→ 0.0
$\text{HGG}^\pm \rightleftharpoons \text{GG}^- + \text{H}^+$													
Расчет	44.3	46.3		45.7	43.6		44.1						0.1M

Процессы диссоциации аминокислот и пептида в водном растворе характеризуются высокими эндоэффектами (табл. 1), соизмеримыми с энтальпиями реакций диссоциации иона аммония [29] и протонированных аминов [30].

Наличие данных об энтальпиях переноса из воды в водно-этанольный растворитель глицина, β -аланина, L- α -фенилаланина и глицил-глицина и их анионов позволяет рассчитать величины изменения энтальпий реакций диссоциации указанных аминокислот и пептида в водных растворах этанола по уравнению (1), исходя из термодинамического цикла (w – вода, s – водно-этанольный растворитель):



Результаты расчета представлены в табл. 2. Расчетные величины энтальпии реакции диссоциации глицина в водных растворах этанола согласуются с нашими [12] и данными [16], полученными экспериментальным методом. Для реакции диссоциации β -аланина расчетные величины ΔH_r также находятся в соответствии со значениями, определенными в работе [13] (табл. 2). Ранее с использованием термодинамического цикла в работе [18] были рассчитаны ΔH_r диссоциации глицина в водно-диметилсульфоксидных смесях с хорошей сходимостью с экспериментальными значениями [31] в каждой точке составов растворителя.

Как следует из табл. 2, реакции диссоциации $^+\text{NH}_3$ -группы аминокислот и глицил-глицина характеризуются практически равными тепловыми эффектами в водном растворе и изменяются симбатно с увеличением концентрации этанола. Зависимости $\Delta_{tr}H_r^\circ = f(X_{\text{EtOH}})$ значительно отличаются от аналогичных зависимостей для других водно-органических смесей (рис. 1). Рассмотрение влияния природы водно-органического растворителя на $\Delta_{tr}H_r^\circ$, исходя из сольватационного подхода [1], показывает, что изменение энтальпии реакции диссоциации аминокислот и пептидов зависит от изменения сольватационных характеристик как исходных цвиттер-ионов, так и продуктов диссоциации. В водных растворах диметилсульфоксида [17, 31] и диоксана [32] возрастание концентрации органического соразтворителя приводит к повышению эндотермичности реакций диссоциации (рис. 1) при росте отрицательного значения $\Delta_{tr}H^\circ$ протона [2], что указывает на значительное различие в энтальпиях переноса глицина (глицил-глицина) и их диссоциированных форм. В водных растворах мочевины для реакции диссоциации глицина значения $\Delta_{tr}H_r^\circ$ [16] (рис. 1) и $\Delta_{tr}H^\circ(\text{H}^+)$ [2] близки в изученной области составов растворителя, что свидетельствует о том, что $\Delta_{tr}H^\circ$ глицина компенсируется изменением энтальпии переноса глицинат-иона. В смесях воды с 2-изопропанолом изменение энтальпии реакции диссоциации глицина [33] (рис. 1) идет симбатно изменению значений энтальпии переноса протона [2]. В водно-этанольных растворах для реакций диссоциации глицина, β -аланина, L- α -фенилаланина и глицил-глицина изменение $\Delta_{tr}H_r^\circ$ также по знаку совпадает с изменением $\Delta_{tr}H^\circ(\text{H}^+)$ [2] (рис. 2). При этом эн-

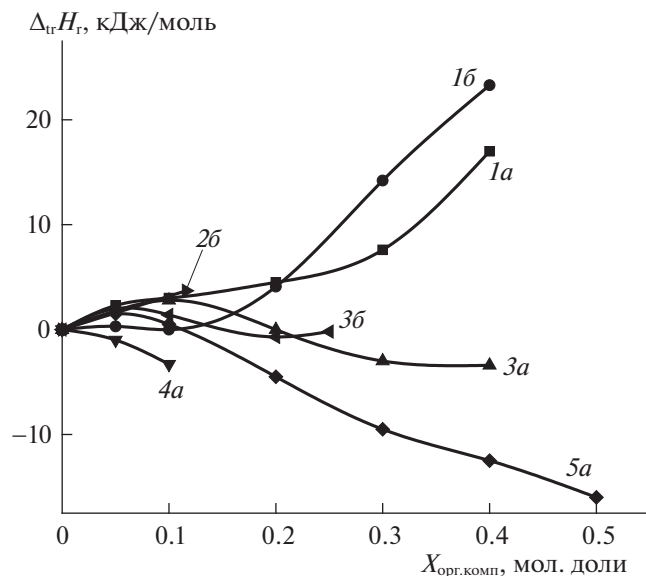


Рис. 1. Изменение энтальпии реакций диссоциации глицина (а) и глицилглицина (б) в водных растворах: 1 – диметилсульфоксида [17, 31], 2 – диоксана [32], 3 – этанола, 4 – мочевины [16], 5 – изопропанола [33].

тальпии переноса цвиттер-ионов глицина, β-аланина, глицил-глицина и их анионов из воды в водно-этанольный растворитель при низких концентрациях спирта взаимокompенсуют друг друга (рис. 2а, 2б, 2г). Большое различие в энтальпиях переноса цвиттер-ионной и анионной форм L-α-фенилаланина при низких концентрациях этанола в растворе определяет высокое экстремальное значение изменения энтальпии реакции диссоциации ароматической аминокислоты в этой области составов растворителя (рис. 2в).

Рассмотрение термодинамических параметров кислотно-основных равновесий различных соединений в водно-этанольных растворах показало, что характер зависимости $\Delta_r H_r = f(X_{\text{EtOH}})$, установленный для глицина, β-аланина, L-α-фе-

нилаланина и глицил-глицина, присущ реакциям кислотной диссоциации независимо от типа диссоциируемой частицы. Наличие на зависимости эндотермического экстремума в области низких концентраций этанола в растворе и отрицательные значения $\Delta_r H_r$ при высоком содержании EtOH наблюдаются как для реакции диссоциации иона аммония [29], так и процессов диссоциации карбоксильных групп, например, адипиновой кислоты [34], глициний-иона [35], β-аланиний-иона [13] (рис. 3). Аналогичное изменение ΔH_r в водно-этанольных растворах отмечено при изучении процессов диссоциации диглицил-глицина [36] и протонированного этилендиамина [30], протекающих по протонированной аминогруппе, процессов диссоциации протонированной никотиновой кислоты [37] и протонированных L-α-аланина, L-α-валина, L-α-серина [38], которые протекают по карбоксильной группе, а также для реакции диссоциации цвиттер-иона никотиновой кислоты [39] и иона имидазолия [40], отщепление протона у которых происходит от протонированного азота пиридинового кольца.

Если изменение энтальпии процессов диссоциации в водно-этанольных смесях происходит однотипно для катионных и незаряженных кислот, то характер изменения энергии Гиббса этих процессов существенно отличается в зависимости от типа диссоциируемого соединения. Установлено, что с ростом концентрации органического компонента в растворе наблюдается линейный рост изменения энергии Гиббса реакций диссоциации карбоновых кислот, протонированных аминокислот и пептидов, которые протекают по карбоксильной группе [41–45 и др.]. Значения изменения энергии Гиббса реакций диссоциации протонированных аминов и аминокислот и пептидов [30, 44–46 и др.] уменьшаются в области низких концентраций этанола в растворе и мало изменяются в дальнейшем повышении содержания EtOH. Причины различий в характере изменений энергии Гиббса

Таблица 3. Изменение термодинамических параметров (кДж/моль) реакций диссоциации глицина и глицилглицина в водно-этанольном растворе при $\mu = 0.1 \text{ M} (\text{NaClO}_4)$, $T = 298 \text{ K}$ и значениях X_{EtOH} от 0 до 0.9 мол. доли

Параметр	0.00	0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.40	0.5	0.6	0.7	0.9
$\text{HG}^{\pm} \rightleftharpoons \text{G}^{-} + \text{H}^{+}$											
ΔG_r	54.5	53.4	52.8	52.0		51.4	51.6	51.1	51.4	50.1	50.9
ΔH_r	43.3	46.1	47.1	44.3		41.3	40.9				
$T\Delta S_r$	-11.2	-7.3	-5.7	-7.7		-10.1	-10.7				
$\text{HGG}^{\pm} \rightleftharpoons \text{GG}^{-} + \text{H}^{+}$											
ΔG_r	46.3	45.7	44.7	43.9	43.6	43.4	42.6	42.7			
ΔH_r	44.3	46.3	45.7	43.6	44.1						
$T\Delta S_r$	-2.0	0.6	1.0	-0.3	0.5						

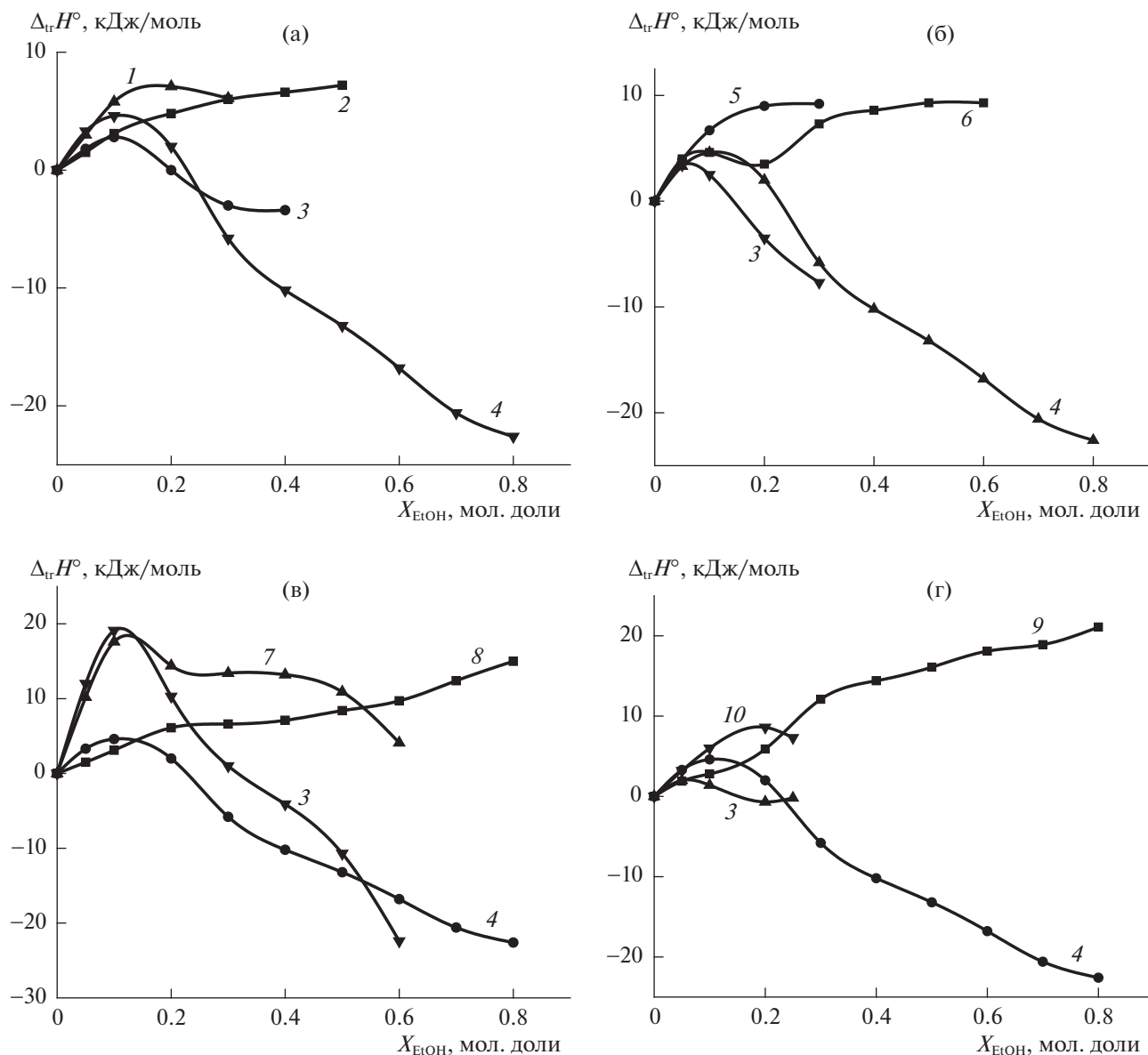


Рис. 2. Изменение энтальпии реакций диссоциации глицина (а), β-аланина (б), L-α-фенилаланина (в), глицил-глицина (г) и пересольватации реагентов в водно-этанольных растворах: 1 – $\Delta_r H^\circ(\text{HG}^\pm)$, 2 – $\Delta_r H^\circ(\text{G}^-)$, 3 – $\Delta_r H^\circ$, 4 – $\Delta_r H^\circ(\text{H}^+)$, 5 – $\Delta_r H^\circ(\beta\text{-HAla}^\pm)$, 6 – $\Delta_r H^\circ(\beta\text{-Ala}^-)$, 7 – $\Delta_r H^\circ(\text{L-}\alpha\text{-Phe}^-)$, 8 – $\Delta_r H^\circ(\text{L-}\alpha\text{-HPhc}^\pm)$, 9 – $\Delta_r H^\circ(\text{GG}^-)$, 10 – $\Delta_r H^\circ(\text{HGG}^\pm)$.

реакций диссоциации различных соединений в смешанном растворителе можно рассмотреть, исходя из вкладов в изменение энергии Гиббса энтальпийной и энтропийной составляющих. Для реакций кислотной диссоциации по карбоксильной группе энтропийная составляющая процесса преобладает над энтальпийной [35, 38], и более значимое изменение энтропии компенсирует немонотонное изменение ΔH_r от состава растворителя, определяя линейный характер изменения энергии Гиббса реакции в водно-органических растворителях. Основной вклад в изменение

энергии Гиббса реакций кислотно-основных взаимодействий аминов вносит энтальпийная составляющая процесса [29, 30]. Расчет ΔG_r и $T\Delta S_r$ для процессов диссоциации глицина и глицил-глицина для водно-этанольных смесей, исходя из констант равновесия [44, 45] и ΔH_r , также показал (табл. 3), что вклад энтропийной составляющей в изменение энергии Гиббса реакций в растворителе вода–этанол незначителен. Значения констант равновесия и изменения энтальпии в водно-этанольном растворителе позволили авторам [13] выполнить расчет изменения энтропии процесса

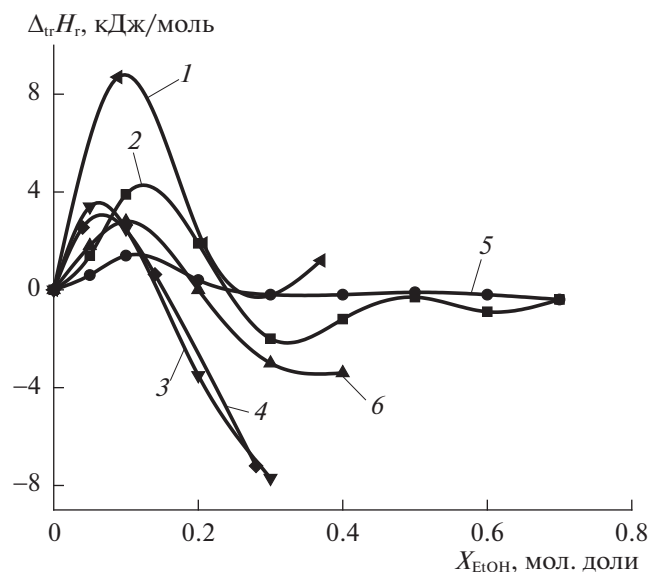


Рис. 3. Изменение энтальпии реакций диссоциации в водно-этанольном растворе: 1 – β -аланиний-иона, 2 – иона аммония, 3 – β -аланина, 4 – адипиновой кислоты, 5 – глициний-иона, 6 – глицина.

диссоциации β -аланина, также продемонстрировав незначительный вклад энтропийной составляющей в изменение энергии Гиббса реакции.

Таким образом, расчет значений изменения энтальпии процессов диссоциации некоторых аминокислот и глицил-глицина в водно-этанольных растворах и сравнение полученных данных с имеющимися экспериментальными значениями, а также сопоставление результатов расчета и эксперимента в работе [31] для водно-диметилсульфоксидных растворов, демонстрируют, что при наличии надежных данных о термодинамических параметрах пересольватации участников равновесного процесса в водно-органических растворителях, можно не только качественно охарактеризовать влияние растворителя на изменение параметров реакции, но и получить расчетным способом данные с удовлетворительной погрешностью.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарнин В.А., Усачева Т.Р., Кузьмина И.А. и др. Комплексообразование в неводных средах: сольватационный подход к описанию роли растворителя / Под ред. В.А. Шарнина. М.: ЛЕНАНД, 2019. – 304 с.
2. Hefter G., Marcus Y., Waghorne W.E. // Chem. Rev. 2002. V. 102. P. 2773.

3. Михеев С.В., Шарнин В.А. // Журн. физ. химии. 2010. Т. 84. № 2. С. 205.
4. Исаева В.А., Наумов В.В., Шарнин В.А. // Там же. 2016. Т. 90. № 5. С. 721.
5. Вандышев В.Н., Леденков С.Ф. // Журн. неорганической химии. 2011. Т. 56. № 10. С. 1754.
6. Вандышев В.Н., Леденков С.Ф. // Там же. 2013. Т. 58. № 12. С. 1685.
7. Spink C.H., Aufer M. // J. Phys. Chem. 1970. Т. 74. № 8. P. 1742.
8. Smirnov V.I., Badelin V.G. // Thermochim. Acta. 2013. V. 565. P. 202.
9. Imran Sk., Hossain A., Mahali K. et al. // J. Mol. Liq. 2018. V. 265. P. 693.
10. Баделин В.Г., Смирнов В.И., Межевой И.Н. // Журн. физ. химии. 2002. Т. 76. № 7. С. 1299.
11. Smirnov V.I., Badelin V.G. // Thermochim. Acta. 2008. V. 471. P. 97.
12. Гессе Ж.Ф., Исаева В.А., Репкин Г.И., Шарнин В.А. // Журн. физ. химии. 2012. Т. 86. № 1. С. 59.
13. Tsurco E.N., Kuchtenko Yu.S. // J. Mol. Liq. 2014. V. 198. P. 95.
14. Кочергина Л.А., Емельянов А.В., Крутова О.Н., Горболетова Г.Г. // Журн. физ. химии. 2007. Т. 81. № 10. С. 1829.
15. Brunetti A., Lim M., Nancollas G. // J. Am. Chem. Soc. 1968. V. 90. P. 5120.
16. Gao H., Hu X., Lin R. // Thermochim. Acta. 2000. V. 346. P. 1.
17. Gesse Zh.F., Repkin G.I., Isaeva V.A., Sharnin V.A. // J. Therm. Anal. Calorim. 2012. V. 110. № 3. P. 1457.
18. Hamborg E.S., Niederer J.P.M., Versteeg G.F. // J. Chem. Eng. Data 2007. 52. № 6. P. 2491.
19. May M., Felsing W.A. // J. Am. Chem. Soc. 1951. V. 73. P. 406.
20. Boyd S., Brannan J.R., Dunsmore H.S., Nancollas G.H. // J. Chem. Eng. Data. 1967. V. 12. P. 601.
21. Rodante F. // Thermochim. Acta. 1989. V. 149. P. 157.
22. Izatt R.M., Wrathall J.W., Anderson K.P. // J. Phys. Chem. 1961. V. 5. № 10. P. 1914.
23. Christensen J.J., Izatt R.M., Wrathall D.P., Hansen L.D. // J. Chem. Soc. (A). 1969. № 8. P. 1212.
24. Anderson K., Greenhalgh W., Butler E. // Inorg. Chem. 1967. V. 6. P. 1056.
25. Goldberg R., Kishore N., Lennen R. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2002. V. 31. P. 231.
26. Кочергина Л.А., Емельянов А.В., Горболетова Г.Г., Крутова О.Н. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2011. Т. 54. № 1. С. 78.
27. Rodante F., Fantauzzi F. // Thermochim. Acta. 1991. V. 176. P. 277.
28. Gergely A., Nagypal I. // J. Chem. Soc. Dalton Trans. 1977. P. 1104.
29. Невский А.В., Шорманов В.А., Крестов Г.А. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 1984. Т. 27. № 2. С. 155.
30. Невский А.В., Шорманов В.А., Крестов Г.А. // Журн. физ. химии. 1987. Т. 61. № 9. С. 2544.

31. *Исаева В.А., Шарнин В.А.* // Там же. 2021. Т. 95. № 10. С. 1526.
32. *Kuritsyn L.V., Kalinina N.V.* // Russ. J. Phys. Chem. A. 1996. V. 70. № 2. P. 347.
33. *Tsurco E.N., Shihova T.M., Bondarev N.V.* // J. Mol. Liq. 2002. V. 96–97. P. 425.
34. *El-Naggar G.A., El-Batouti M., Zaghoul A.A.* // Portugal. Electrochim. Acta. 2000. V. 18. P. 71.
35. *Исаева В.А., Шарнин В.А.* // Журн. физ. химии. 2018. Т. 92. № 11. С. 1727.
36. *Фам Тхи Л., Усачева Т.Р., Шарнин В.А.* // Там же. 2016. Т. 90. № 12. С. 1816.
37. *Куранова Н.Н., Душина С.В., Шарнин В.А.* // Там же. 2010. Т. 84. № 5. С. 892.
38. *Gang L., Ruisen L., Hanxing Z.* // Acta Phys. Chim. Sinica. 2000. V. 16. № 2. P. 188.
39. *Niazi M.S.K., Mollin J.* // J. Chem. Eng. Data. 1994. V. 39. P. 830.
40. *Корягин Ю.С., Шорманов В.А., Крестов Г.А.* // Известия вузов. Химия и хим. технология. 1979. Т. 22. № 4. С. 500.
41. *Исаева В.А., Шарнин В.А., Шорманов В.А.* // Журн. физ. химии. 1997. Т. 71. № 8. С. 1371.
42. *Тукумова Н.В., Алешин С.Н., Усачева Т.Р., Шарнин В.А.* // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2010. Т. 53. № 5. С. 41.
43. *Тукумова Н.В., Тхуан Чан Тхи Зьеу, Усачева Т.Р., Шарнин В.А.* // Журн. физ. химии. 2018. Т. 92. № 12. С. 1988.
44. *Исаева В.А., Шарнин В.А., Шорманов В.А., Баранова И.А.* // Там же. 1996. Т. 70. № 8. С. 1421.
45. *Наумов В.В., Исаева В.А., Шарнин В.А.* // Журн. неорганической химии. 2011. Т. 56. № 7. С. 1208.
46. *Невский А.В., Шорманов В.А., Крестов Г.А.* // Журн. физ. химии. 1984. Т. 58. № 1. С. 97.