

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ИЗОМЕРИИ АЛИФАТИЧЕСКИХ ДИПЕПТИДОВ НА ЭНТАЛЬПИЙНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С КСИЛИТОМ В ВОДЕ

© 2022 г. И. Н. Межевой<sup>а,\*</sup>, Н. М. Громова<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

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

\*e-mail: inm@isc-ras.ru

Поступила в редакцию 15.04.2022 г.

После доработки 13.05.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

Методом калориметрии растворения получены энтальпии растворения  $\Delta_{\text{sol}}H^m$  L- $\alpha$ -аланил-L- $\alpha$ -аланина, DL- $\alpha$ -аланил-DL- $\alpha$ -аланина и  $\beta$ -аланил- $\beta$ -аланина в водных растворах с ксилитом при концентрации многоатомного спирта до 1 моль/кг р-ля. Рассчитаны стандартные значения энтальпий растворения ( $\Delta_{\text{sol}}H^0$ ) и переноса ( $\Delta_{\text{tr}}H^0$ ) дипептидов из воды в водные растворы ксилита. Рассчитанные энтальпийные коэффициенты парных взаимодействий дипептидов с молекулами многоатомного спирта имеют положительные и отрицательные значения. Обнаружено влияние изомерии пептидов на энтальпийные характеристики их взаимодействия с ксилитом в водных растворах. Проведен анализ влияния различных типов взаимодействий в растворах и структурных особенностей биомолекул на термодинамические характеристики растворения олигопептидов.

*Ключевые слова:* дипептиды, ксилит, энтальпия растворения, водный раствор, гидрофобное взаимодействие

DOI: 10.31857/S0044453722120196

Известно, что многоатомные спирты помогают в стабилизации природных конформаций шаровидных белков и моделируют гидрофильную наружную часть клеточной мембраны [1–3]. “Сахарные” многоатомные спирты находят широкое применение как стабилизирующие и безопасные добавки в пищевой и фармацевтической промышленности, как заменители сахарозы при заболеваниях диабетом [4]. Комплексное изучение физико-химических и термодинамических параметров взаимодействия пептидов с биомолекулами необходимо для более глубокого понимания механизмов стабилизации белков в растворах и количественной оценки параметров энергии взаимодействия в трехкомпонентной системе [5, 6].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Измерения энтальпий растворения дипептидов проводили на калориметре переменной температуры с изотермической оболочкой [7]. Объем калориметрической ячейки составил ~110 мл. Для оценки точности и надежности работы калориметрической установки были измерены тепловые эффекты растворения KCl в воде при 298.15 К. Из десяти независимых измерений энтальпий рас-

творения KCl в H<sub>2</sub>O получено значение стандартной  $\Delta_{\text{sol}}H^0 = 17.23 \pm 0.06$  кДж/моль, которое хорошо согласуется с рекомендуемой величиной в литературе ( $17.22 \pm 0.04$  кДж/моль) [8, 9].

Навески пептидов тщательно растирались в ступке для уменьшения времени растворения и высушивались до постоянной массы. Далее дипептид помещали в тонкостенную стеклянную ампулу, закрывали силиконовой пробкой и взвешивали на весах ВЛР-200 с точностью  $1 \times 10^{-4}$  г. После ампулу запаивали и помещали в ампулодержатель в реакционном стакане. Навески ксилита и растворитель взвешивали также на весах ВЛР-200 с точностью  $1 \times 10^{-4}$  г. После сборки калориметрическую ячейку помещали в блок вторичного термостатирования и система термостатировалась при заданной температуре. Достижение термического равновесия определяли по горизонтальному ходу графопостроителя. После разбития ампулы записывался начальный и конечный период опытов. Затем система в зависимости от теплового эффекта нагревалась или охлаждалась и, после достижения равновесия, проводилась калибровка электрическим током. Калибровка проводилась таким образом, чтобы

**Таблица 1.** Стандартные энтальпии растворения  $\Delta_{\text{sol}}H^0$  (кДж/моль) дипептидов в смешанном растворителе вода–ксилит при 298.15 К

L- $\alpha$ -аланил-L- $\alpha$ -аланин		DL- $\alpha$ -аланил-DL- $\alpha$ -аланина		$\beta$ -аланил- $\beta$ -аланин	
$m$	$-\Delta_{\text{sol}}H^0$	$m$	$-\Delta_{\text{sol}}H^0$	$m$	$\Delta_{\text{sol}}H^0$
0	10.79 $\pm$ 0.06	0	7.29 $\pm$ 0.05	0	5.67 $\pm$ 0.04
0.1	10.37 $\pm$ 0.06	0.1	7.04 $\pm$ 0.05	0.1	5.34 $\pm$ 0.04
0.2	9.99 $\pm$ 0.06	0.2	6.81 $\pm$ 0.05	0.2	5.01 $\pm$ 0.04
0.3	9.71 $\pm$ 0.06	0.3	6.61 $\pm$ 0.05	0.3	4.73 $\pm$ 0.04
0.4	9.47 $\pm$ 0.06	0.4	6.47 $\pm$ 0.05	0.4	4.51 $\pm$ 0.04
0.5	9.33 $\pm$ 0.06	0.5	6.34 $\pm$ 0.05	0.5	4.33 $\pm$ 0.03
0.6	9.18 $\pm$ 0.06	0.6	6.21 $\pm$ 0.05	0.6	4.15 $\pm$ 0.03
0.7	9.14 $\pm$ 0.06	0.7	6.13 $\pm$ 0.05	0.7	4.07 $\pm$ 0.03
0.8	9.13 $\pm$ 0.06	0.8	6.09 $\pm$ 0.04	0.8	3.99 $\pm$ 0.03
0.9	9.24 $\pm$ 0.06	0.9	6.08 $\pm$ 0.04	0.9	3.94 $\pm$ 0.03
1.0	9.39 $\pm$ 0.06	1.0	6.10 $\pm$ 0.04	1.0	3.90 $\pm$ 0.03

Обозначения:  $m$  – моляльность ксилита (моль/кг).

ход графопостроителя был как можно ближе к ходу во время опыта ( $\Delta I_{\text{он}} \sim \Delta I_{\text{к}}$ ). При этом сила тока выбиралась так, чтобы время калибровки составляло не менее 100 с. Полученные кривые изменения температуры во времени  $t = f(\tau)$  обрабатывались графическим методом [10] и вычислялся тепловой эффект растворения дипептида.

Концентрация дипептидов варьировалась в интервале 0.006–0.007 моль/кг. Средние арифметические значения из 2–3 полученных величин энтальпий растворения  $\Delta_{\text{sol}}H^m$  дипептида в исследованной концентрационной области при моляльностях до 0.01 моль/кг можно принять за стандартные значения  $\Delta_{\text{sol}}H^0$  ввиду низких концентраций биомолекулы и отсутствием концентрационной зависимости [11–13]. Все дипептиды (Reanal, 98+%) перед экспериментом подвергали перекристаллизации из смеси вода–этанол, сушили под вакуумом при 343 К в течение 48 ч. В экспериментах использовали дважды дистиллированную воду. Ксилит (Acros Organics, 99+%) использовали без дополнительной очистки. Растворы готовили весовым методом с точностью до 0.0001 г.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассчитанные стандартные энтальпии растворения по  $\Delta_{\text{sol}}H^0$  L- $\alpha$ -аланил-L- $\alpha$ -аланина (Ala-Ala), DL- $\alpha$ -аланил-DL- $\alpha$ -аланина (DL-Ala-DL-Ala) и  $\beta$ -аланил- $\beta$ -аланин ( $\beta$ -Ala- $\beta$ -Ala) в растворах воды с ксилитом ( $X_{\text{л}}$ ) представлены в табл. 1. Энтальпии переноса дипептидов рассчитывали по формуле:

$$\Delta_{\text{tr}}H^0(w \rightarrow w + y) = \Delta_{\text{sol}}H^0(x \rightarrow w + y) - \Delta_{\text{sol}}H^0(x \rightarrow w), \quad (1)$$

где  $\Delta_{\text{tr}}H^0(w \rightarrow w + y)$  – стандартные энтальпии переноса дипептидов из воды в водные растворы ксилита,  $\Delta_{\text{sol}}H^0(x \rightarrow w + y)$  – стандартные энтальпии растворения дипептидов в водном растворе ксилита,  $\Delta_{\text{sol}}H^0(x \rightarrow w)$  – стандартные энтальпии растворения дипептидов в воде.

Зависимости энтальпий переноса  $\Delta_{\text{tr}}H^0$  L-аланина [14] и изученных дипептидов из воды в водные растворы многоатомного спирта от молярной доли ксилита ( $X_2$ ) представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, полученные зависимости для L-Ala и дипептидов  $\Delta_{\text{tr}}H^0$  от молярной доли соразрастворителя имеют экстремальный характер поведения в исследованном интервале концентраций многоатомных спиртов. Энтальпии переноса определяются различными вкладами с противоположными знаками от конкурирующих в растворе взаимодействий различной природы и процессов гидратации. Для анализа построенных графических зависимостей был использован подход, основанный на анализе модели взаимодействий растворенного вещества и соразрастворителя [15]. В трехкомпонентных системах дипептид – ксилит – вода молекулы гидратированных растворенных веществ находятся в непосредственной близости в процессе взаимодействия. В результате происходит частичная дегидратация вещества, что приводит к изменению природы и характера межмолекулярных взаимодействий в трехкомпонентных растворах. Рассчитанные энтальпии переноса для дипептидов будут определяться суммой вкладов теплот растворения с проти-

воположными знаками. Происходящие изменения термодинамических величин в многокомпонентной системе можно описать уравнением с несколькими слагаемыми с различными знаками:

$$\Delta_{\text{tr}}H^0 = -\Delta H_1 - \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4, \quad (2)$$

где  $\Delta H_1$  – ион-биполярные взаимодействия, происходящие между цвиттерионными центрами дипептидов и аминокислоты и ОН-группами многоатомного спирта;  $\Delta H_2$  – гидрофильно-гидрофильные групповые взаимодействия между пептидными группами олигопептидов  $\text{C}=\text{O}-\text{NH}$  и  $-\text{OH}$ -группой полиспиртов, происходящие через образование водородной связи;  $\Delta H_3$  – гидрофобно-гидрофильные взаимодействия между неполярными областями дипептидов и L-аланина или ксилита и ОН-группами многоатомного спирта или цвиттерионных центров дипептидов и аминокислоты;  $\Delta H_4$  – гидрофобно-гидрофобные взаимодействия между неполярными областями дипептидов (аминокислоты) и многоатомного спирта.

Первые два типа взаимодействия вносят отрицательный, а третий и четвертый типы – положительные вклады в  $\Delta_{\text{tr}}H^0$  дипептидов из воды в раствор ксилита с водой. Положительные значения  $\Delta_{\text{tr}}H^0$  для DL- $\alpha$ -Ala-DL- $\alpha$ -Ala и L- $\alpha$ -Ala-L- $\alpha$ -Ala во всем интервале составов в растворах ксилита (рис. 1), указывают на преобладание третьего ( $\Delta H_3$ ) и четвертого ( $\Delta H_4$ ) типов взаимодействий. После прохождения максимума энтальпии переноса плавно уменьшаются, что означает доминирование ион-биполярных и гидрофильно-гидрофильных групповых взаимодействий. Преобладание данных типов взаимодействий особенно проявляется для линейного изомера диаланина с наиболее отрицательными энтальпиями переноса во всем интервале концентраций ксилита. При увеличении концентраций ксилита взаимодействия между полярными группами многоатомного спирта и цвиттер-ионными центрами дипептида становятся более сильными, что приводит к увеличению доли экзо-эффектов в трехкомпонентном растворе. Экстремумы на графиках зависимостей энтальпий переноса дипептидов и L-аланина при различных мольных долях многоатомного спирта означают, что вклады от гидрофобно-гидрофильных и гидрофобно-гидрофобных групповых взаимодействиях максимальны при соответствующих концентрациях ксилита.

Для количественной оценки межмолекулярных взаимодействий в водных растворах проведен регрессионный анализ в рамках теории Мак-Миллана–Майера [16] путем расчета энтальпийных коэффициентов парных взаимодействий ( $h_{xy}$ ) олигопептида с молекулами многоатомных спиртов. Концентрационные зависимости  $\Delta_{\text{sol}}H^0 =$

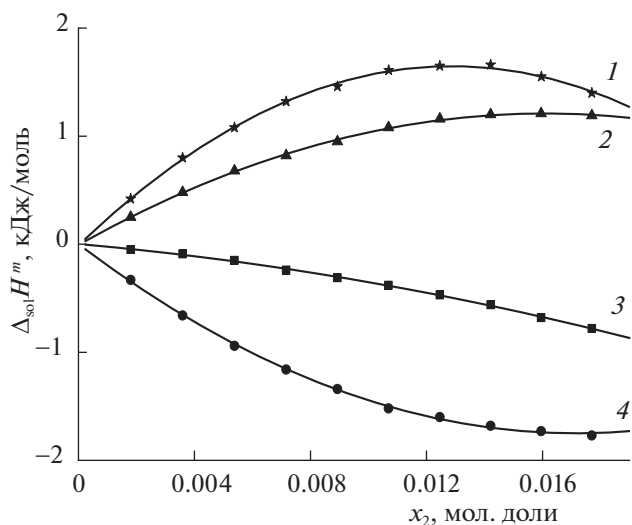


Рис. 1. Зависимости энтальпий переноса ( $\Delta_{\text{tr}}H^0$ ) аминокислоты и дипептидов из воды в ее смеси с ксилитом от мольной доли многоатомного спирта ( $x_2$ ) при 298.15 К: 1 – L-Ala-L-Ala, 2 – DL-Ala-DL-Ala, 3 – L-Ala [7], 4 –  $\beta$ -Ala- $\beta$ -Ala.

$= f(m_y)$  дипептидов в растворах ксилита были обработаны полиномом второй степени:

$$\Delta_{\text{sol}}H^0 = a_0 + a_1m_y + a_2m_y^2, \quad (3)$$

где  $m_y$  – моляльная концентрация многоатомного спирта,  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  – коэффициенты аппроксимации, рассчитываемые методом наименьших квадратов.

В результате проведенного расчета были получены регрессионные уравнения для L- $\alpha$ -аланил-L- $\alpha$ -аланина (3), DL- $\alpha$ -аланил-DL- $\alpha$ -аланина (4) и  $\beta$ -аланил- $\beta$ -аланин (5) в водных растворах ксилита

$$\Delta_{\text{sol}}H^0 = (-10.79 \pm 0.02) + (4.56 \pm 0.09)m_y - \dots, \quad (4)$$

$$R = 0.998, \quad N = 10,$$

$$\Delta_{\text{sol}}H^0 = (-7.29 \pm 0.01) + (2.68 \pm 0.06)m_y - \dots, \quad (5)$$

$$R = 0.999, \quad N = 10,$$

$$\Delta_{\text{sol}}H^0 = (5.67 \pm 0.02) - (3.62 \pm 0.09)m_y - \dots, \quad (6)$$

$$R = 0.999, \quad N = 10.$$

Значения свободных членов уравнений (4)–(6) соответствуют стандартной энтальпии растворения дипептидов в чистой воде, которые хорошо согласуются с нашими и литературными значениями, например:  $\Delta_{\text{sol}}H^0(\text{L-Ala-L-Ala}) = -10.79$  (кДж/моль) [17];  $\Delta_{\text{sol}}H^0(\text{L-Ala-L-Ala}) = -11.00$  (кДж/моль) [18];  $\Delta_{\text{sol}}H^0(\text{DL-Ala-DL-Ala}) = -7.59$  (кДж/моль) [19];  $\Delta_{\text{sol}}H^0(\text{DL-Ala-DL-Ala}) = -7.29$  (кДж/моль) [20];  $\Delta_{\text{sol}}H^0(\beta\text{-Ala-}\beta\text{-Ala}) =$

**Таблица 2.** Энтальпийные коэффициенты парных взаимодействий  $h_{xy}$  (Дж кг моль<sup>-2</sup>) аминокислоты и дипептидов с ксилитом в водных растворах при 298.15 К

L-аланин	$\beta$ -аланил- $\beta$ -аланин	L- $\alpha$ -аланил-L- $\alpha$ -аланин	DL- $\alpha$ -аланил-DL- $\alpha$ -аланин
$-216 \pm 18$ [14]	$-1810 \pm 47$	$2280 \pm 44$	$1341 \pm 28$

5.67 (кДж/моль) [17, 21]. Энтальпийные коэффициенты парных взаимодействий  $h_{xy}$  были рассчитаны по уравнению:  $h_{xy} = a_1/2$  [22]. Рассчитанные для дипептидов и полученные нами ранее значения для L-аланина [14] в растворах ксилита представлены в табл. 2.

Полученные энтальпийные коэффициенты парного взаимодействия  $h_{xy}$  имеют отрицательные значения, за исключением стереоизомеров диаланина. Это означает, что прямые гидрофильно-гидрофильные групповые взаимодействия между цвиттерионами биомолекул и ксилитом преобладают над дегидратацией компонентов раствора. Гидрофобная гидратация и гидрофобные взаимодействия существенно влияют на получаемые термодинамические характеристики растворения и играют важнейшую роль в системах с аминокислотами, олигопептидами и белками [23, 24]. Вокруг неполярных метильных групп молекулы воды более сильно связаны друг с другом и энергии для разрыва межмолекулярных связей при взаимодействии биомолекул требуется несколько больше [25]. Цвиттер-ионные молекулы за счет электростатических взаимодействий различной природы усиливают гидрофобные взаимодействия в трехкомпонентном водном растворе. Из табл. 2 видно, что положительные значения  $h_{xy}$  для стереоизомеров диаланина и существенная разница по абсолютной величине по сравнению со значением для линейной структурой  $\beta$ -Ala- $\beta$ -Ala, указывает на вклад эффектов гидрофобных взаимодействий боковых метильных  $\text{CH}_3$ -групп пептида. В результате происходит уменьшение степени упорядоченности раствора при взаимодействии гидратированных молекул, увеличение доли эндотермичности растворения и росту величин энтальпийных коэффициентов парного взаимодействия.

Энтальпийные коэффициенты парного взаимодействия  $h_{xy}$  исследованных L-аланина и дипептидов с различным расположением углеводородных радикалов с лиофобными свойствами увеличиваются в ряду:  $\beta$ -Ala- $\beta$ -Ala < L-Ala < DL-Ala-DL-Ala < L-Ala-L-Ala. Более высокий  $h_{xy}$  для L-Ala-L-Ala по сравнению с  $\beta$ -Ala- $\beta$ -Ala связан с наличием в молекуле двух боковых метильных групп, что способствует гидрофобной гидратации, проявляющейся в упрочнении водо-

родных связей воды вокруг  $\text{CH}_3$ -групп. Кроме того, метильные группы могут стерически препятствовать электростатическим и донорно-акцепторным взаимодействиям пептидной группы CONH с полярными OH-группами ксилита. В результате экзотермичность растворения  $\beta$ -аланил- $\beta$ -аланина растёт и  $h_{xy}$  для системы дипептид-ксилит становится отрицательным. Частичное замещение L-стереоизомера на D-форму приводит к более отрицательным значениям для рацемической смеси двух энантиомеров по сравнению с одной структурой дипептида. Это означает, что пространственное расположение метильной группы также влияет на получаемые термодинамические характеристики взаимодействия.

В молекуле L- $\alpha$ -аланил-L- $\alpha$ -аланина по сравнению с L-аланином появляются одна дополнительная пептидная группа CONH, способная к донорно-акцепторным взаимодействиям, что вносит значительный энтальпийный экзотермический эффект в трехкомпонентную систему. С другой стороны, молекула дипептида содержит дополнительные метиленовую и метильную группы, что способствует увеличению степени дегидратации и гидрофобного взаимодействия при растворении L- $\alpha$ -аланил-L- $\alpha$ -аланина и росту эндотермических эффектов. Анализ величин  $h_{xy}$  показывает, что основной вклад в термодинамику растворения вносят прямые взаимодействия пептидной группы и цвиттерионных центров L- $\alpha$ -аланил-L- $\alpha$ -аланина с полярными OH-группами ксилита, что отражается в более отрицательном значении.

Таким образом, проведенное исследование показало существенное влияние структурной и стереоизомерии, гидрофобных взаимодействий молекул дипептидов и ксилита на термодинамические характеристики растворения биомолекул. Обнаружено более сильное взаимодействие рацемической смеси энантиомеров по сравнению с L-стереоизомером алифатического дипептида и экранирование прямых взаимодействий L(DL)- $\alpha$ -аланил-L(DL)- $\alpha$ -аланина с ксилитом через пептидную CONH-группу разветвленных форм диаланина по сравнению с линейной  $\beta$ -формой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № АААА-А21-121011490059-5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barone G., Castronuovo G., Elia V., Srassinopoulou K. // J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1984. V. 80. № 11. P. 3095.  
<https://doi.org/10.1039/F19848003095>
2. Dill K.A. // Biochemistry. 1990. V. 29. № 31. P. 7133.  
<https://doi.org/10.1021/bi00483a001>

3. *Timasheff S.N.* // Ann. Rev. Biophys. Biomol. Struct. 1993. V. 22. P. 67.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.bb.22.060193.000435>
4. *Granström, T.B., Izumori, K., Leisola, M.* // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2007. V. 74. P. 277.  
<https://doi.org/10.1007/s00253-006-0761-3>
5. *Тюнина Е.Ю., Межевой И.Н., Дуняева В.В.* // J. Chem. Thermodyn. 2020. V. 150. 106206.  
<https://doi.org/10.1016/j.jct.2020.106206>
6. *Тюнина Е.Ю., Межевой И.Н., Ставнова А.А.* // J. Mol. Liquids. 2021. V. 329. 115568.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115568>
7. *Баделин В.Г., Тюнина Е.Ю., Межевой И.Н.* // Журн. прикл. химии. 2007. Т. 80. Вып. 5. С. 732. [*Badelin V.G., Tyunina E.Yu., Mezhevoi I.N.* // Russ. J. Appl. Chem. 2007. V. 80. P. 711.  
<https://doi.org/10.1134/S1070427207050047>].
8. *Wadsö I., Goldberg R.N.* // Pure Appl. Chem. 2001. V. 73, P. 1625.  
<https://doi.org/10.1351/pac200173101625>
9. *Archer D.G.* // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1999. V. 28. P. 1.  
<https://doi.org/10.1063/1.556034>
10. *Wadso I.* // 7 Science Tools the LKB Instrument J. 1966. V. 13. P. 33.
11. *Межевой И.Н., Баделин В.Г.* // Изв. акад. наук. Сер. химич. 2008. № 12. С. 2402.
12. *Kustov A.V., Antonova O.A., Smirnova N.L.* // J. Mol. Liquids. 2017. V. 232. P. 214.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.065>
13. *Kustov A.V., Antonova O.A., Smirnova N.L.* // J. Ther. Anal. Calorim. 2017. V. 129. P. 461.  
<https://doi.org/10.1007/s10973-017-6172-0>
14. *Межевой И.Н., Баделин В.Г.* // Журн. физ. химии. 2013. Т. 87. № 4. С. 610.
15. *Lilley T.H.* // Pure Appl. Chem. 1993. V. 65. P. 2551.  
<https://doi.org/10.1351/pac199365122551>
16. *McMillan W.G., Mayer J.E.* // J. Chem. Phys. 1945. V. 13. P. 276.  
<https://doi.org/10.1063/1.1724036>
17. *Barannikov V.P., Kurbatova M.S., Mezhevoi I.N.* // Thermochim. Acta. 2020. V. 689. 178647.  
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178647>
18. *Matsumoto M., Amaya K.* // Bull. Chem. Soc. Jap. 1983. V. 56. № 8. P. 2521.  
<https://doi.org/10.1246/bcsj.56.2521>
19. *Nowicka B., Piekarski H.* // J. Mol. Liquids 2002. V. 95. P. 323.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-7322\(01\)00297-5](https://doi.org/10.1016/S0167-7322(01)00297-5)
20. *Баделин В.Г., Межевой И.Н.* // Журн. орган. химии. 2017. Т. 87. С. 1357.
21. *Smirnov V.I., Badelin V.G.* // Thermochim. Acta. 2011. V. 524. P. 35.  
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.06.008>
22. *Desnoyers J.E., Perron G., Avedikian L. et al.* // J. Solution Chem. 1976. V. 5. P. 631.  
<https://doi.org/10.1007/BF00648221>
23. *Makhatadze G.I., Privalov P.L.* // J. Mol. Biol. 1990. V. 213. P. 375.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-2836\(05\)80197-4](https://doi.org/10.1016/S0022-2836(05)80197-4)
24. *Межевой И.Н., Баделин В.Г.* // Журн. орган. химии. 2014. Т. 84. Вып. 2. С. 229.
25. *Ide M., Maeda Y., Kitano H.* // J. Phys. Chem. B. 1997. V. 101. P. 7022.  
<https://doi.org/10.1021/jp971334m>