

УДК 544.35:544.355-128:547.112.3

**ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА, СТРУКТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ И ГИДРАТАЦИЯ  
АМИНОКИСЛОТ В ВОДНО-СОЛЕВЫХ СИСТЕМАХ****В.П. Королёв***Институт химии растворов РАН им. Г.А. Крестова, Иваново*  
E-mail: korolev@isuct.ru*Статья поступила 13 февраля 2012 г.**С доработки — 16 апреля 2012 г.*

Зависимость стандартных парциальных объемов глицина,  $\alpha$ -аланина и серина от ионной силы водных растворов хлорида и сульфата натрия воспроизведена расширенным уравнением Мэссона:  $\bar{V}^0 = \bar{V}_W^0 + AI^{0.5} + BI$ . Погрешность менее  $0,2 \text{ см}^3/\text{моль}$  достигнута с использованием пяти значений параметров  $A$  и  $B$ : два значения  $A$  определяются видом соли, три значения  $B$  определяются видом аминокислоты. Предложен новый вариант аддитивно-группового подхода для  $\Delta\bar{V}^0 = \bar{V}^0 - \bar{V}_W^0$ . Найдено, что парциальные объемы групп  $\text{CH}_3$  ( $\alpha$ -аланин) и  $\text{CH}_2$  (серин) не зависят от концентрации солей. Парциальный объем группы  $\text{CH}_2$  глицина растет с концентрацией. Получены структурные характеристики гидратных комплексов групп  $\text{NH}_3^+$ ,  $\text{COO}^-$ : гидратные числа, молярные объемы воды в гидратной сфере и вне ее, собственный объем  $\text{NH}_3^+$ ,  $\text{COO}^-$  в растворе. При одинаковой ионной силе несколько более сильное обезвоживание заряженных групп производит водный раствор сульфата натрия.

**Ключевые слова:** парциальный объем, аминокислоты, водно-солевые растворы, вклады групп, гидратные числа.

В водных растворах хлорида [1] и сульфата [2] натрия парциальный объем углеводородных радикалов аминокислот уменьшается по сравнению с водой. Парциальный объем заряженных групп  $\text{NH}_3^+$ ,  $\text{COO}^-$  аминокислот заметно увеличивается при переходе от воды к раствору поваренной соли [1]. В плане поиска закономерностей поведения аминокислот в водно-солевых системах, изучения структурных эффектов представляет интерес провести сравнительное исследование гидратации аминокислот, их заряженных групп и радикалов в растворах  $\text{NaCl}$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Обсуждаемые соли содержат одноименный катион, значит их воздействие на структуру воды будет определяться анионом. Согласно [3], ион  $\text{SO}_4^{2-}$  является более слабым разрушителем структуры воды, чем  $\text{Cl}^-$ , а ион  $\text{Na}^+$  относится к пограничной категории. По данным [4], сульфат-ион структурирует воду (см. также [5, 6]). Заряженные группы  $\text{NH}_3^+$  и  $\text{COO}^-$  аминокислот действуют как разрушители сетки Н-связей воды [7, 8], а их углеводородные радикалы оказывают слабое влияние на структуру [7]. Более тонкая детализация обсуждаемых эффектов в водных растворах аминокислот проведена, например, в [9, 10].

В настоящей работе будут рассмотрены объемные характеристики аминокислот глицина,  $\alpha$ -аланина и серина в водных растворах  $\text{NaCl}$  [1, 11] и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  [2, 6, 12]\*. Отметим, что в ука-

## Параметры уравнения (1) для тройных систем вода—соль—аминокислота

Аминокислота	$\bar{V}_W^0$	$B$	$s$	$\bar{V}_W^0$	$B$	$s$
	H <sub>2</sub> O+NaCl ( $A=1,6$ )			H <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ( $A=1,9$ )		
Глицин	43,07	0,37±0,02	0,09	43,10	0,38±0,02	0,17
α-Аланин	60,50	0,20±0,02	0,10	60,35	0,21±0,02	0,15
Серин	60,25	0,72±0,03	0,18	60,51	0,64±0,03	0,16

Примечание.  $\bar{V}_W^0$  в см<sup>3</sup>/моль;  $s$  — стандартное отклонение, см<sup>3</sup>/моль.

занных работах изучали L-аминокислоты, только данные [1] и [6] относятся к DL-серину и DL-аланину соответственно. Укажем также, что в работе [2] измерения проведены лишь для одномолярного Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, а в [11] — для 1*m* и 2*m* NaCl (*m* — моляльность).

В работе [13] показано, что зависимость кажущегося объема солей от концентрации хорошо воспроизводится ("расширенным") уравнением Мэссона. Мы исследовали возможности уравнения этого вида применительно к нашим системам. Поскольку рассматриваемые электролиты относятся к разным валентным типам, мы использовали вместо моляльности такую характеристику, как ионная сила  $I$

$$\bar{V}^0 = \bar{V}_W^0 + AI^{0,5} + BI, \quad (1)$$

где  $\bar{V}^0$  и  $\bar{V}_W^0$  — стандартные парциальные объемы аминокислоты в водно-солевом растворе и воде соответственно;  $A$  и  $B$  — подгоночные параметры.

Каждая из шести изученных систем включала данные как минимум двух источников, поэтому в расчетах использовали взвешенные средние величины  $\bar{V}_W^0$ , найденные с учетом числа значений  $\bar{V}^0$ , определенных в данной работе.

Предварительный анализ имеющегося материала позволил сделать важный шаг: найти среднее значение параметра  $A$  в уравнении (1). Оказалось, что для трех аминокислот в водном растворе NaCl  $A = 1,6$ , а в водном растворе Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  $A = 1,9$ . Теперь в уравнении (1) остается один подгоночный параметр  $B$ . Результаты анализа даны в таблице, где приведены также взвешенные средние величины  $\bar{V}_W^0$ . Из данных таблицы следует вывод: параметр  $B$  для данной аминокислоты в двух водно-солевых системах имеет одинаковое значение. Тогда уравнение (1) можно переписать

$$\Delta\bar{V}^0 = \bar{V}^0 - \bar{V}_W^0 = AI^{0,5} + BI, \quad (2)$$

где  $\Delta\bar{V}^0$  — изменение объема при переносе аминокислоты из воды в водно-солевой раствор,  $A = 1,6$  (NaCl<sub>aq</sub>),  $A = 1,9$  (Na<sub>2</sub>SO<sub>4aq</sub>),  $B = 0,4$  (Gly),  $B = 0,2$  (α-Ala),  $B = 0,7$  (Ser).

Результаты расчетов сопоставлены с опытными данными на рис. 1 и 2. В случае двухпараметрового уравнения для трех аминокислот в двух водно-солевых системах требуется в общем случае 12 значений параметров. В нашем уравнении (2) число таких значений удалось уменьшить до пяти: два значения  $A$  определяются видом соли, три значения  $B$  определяются видом аминокислоты. Поэтому указанное уравнение имеет самостоятельную ценность как обобщающее и обладающее предсказательными возможностями\*. Ниже будет показано, что  $B = 0,4$  для β-аланина в водном NaCl. Тогда  $\Delta\bar{V}^0$  для этой аминокислоты в водном растворе Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> можно рассчитать по соотношению

$$\Delta\bar{V}^0 = 1,9I^{0,5} + 0,4I. \quad (3)$$

Уравнение (2), как и любое другое, можно использовать для реализации любой схемы, основанной на аддитивности вкладов групп. Формулу аминокислоты можно записать как

\* Для алифатической аминокислоты валина в наших системах можно записать уравнение  $\bar{V}^0 = \bar{V}_W^0 + AI^{0,5} + 0,2I$ , где  $\bar{V}_W^0 = 90,39 \pm 0,14$  см<sup>3</sup>/моль [2].

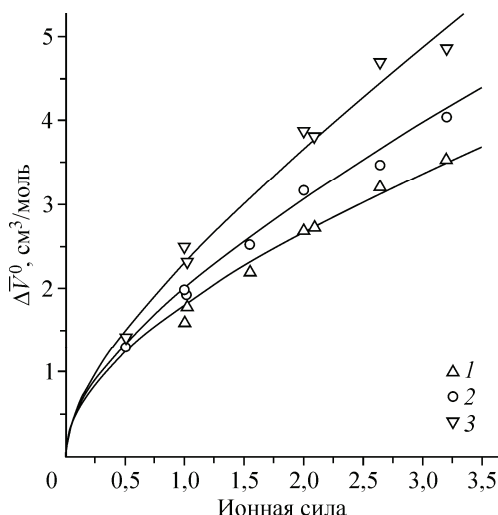


Рис. 1. Изменение объема при переносе  $\alpha$ -аланина (1), глицина (2), серина (3) из воды в водный раствор хлорида натрия. Использованы данные [1, 11]. Линии — уравнение (2)

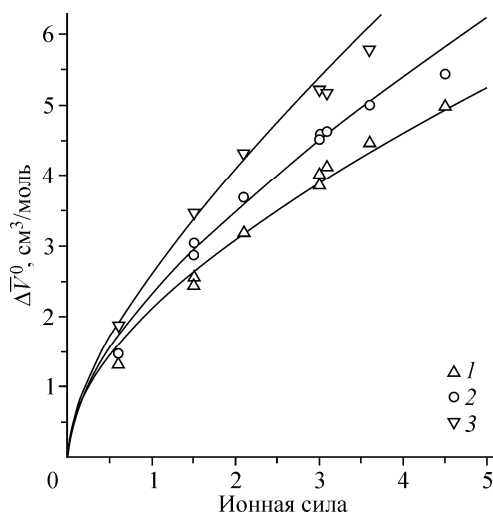


Рис. 2. Изменение объема при переносе  $\alpha$ -аланина (1), глицина (2), серина (3) из воды в водный раствор сульфата натрия. Использованы данные [2, 6, 12]. Линии — уравнение (2)

$\text{NH}_3^+ \text{RCOO}^-$ , где  $\text{R} = \text{CH}_2$  (глицин),  $\text{R} = \text{CHCH}_3$  ( $\alpha$ -аланин),  $\text{R} = \text{CHCH}_2\text{OH}$  (серин). Предложенный в литературе (см. [1, 2] и ссылки в них) вариант аддитивно-групповой схемы основан на допущении, что атомы водорода, связанные с различными атомами углерода, эквивалентны в плане взаимодействия с растворителем, т.е. дают одинаковый объемный эффект

$$\Delta \bar{V}^0(\text{CH}_3) = 1,5 \Delta \bar{V}^0(\text{CH}_2) = 3 \Delta \bar{V}^0(\text{CH}). \quad (4)$$

Вклад метиленовой группы находят как разность  $\Delta \bar{V}^0(\alpha\text{-Ala}) - \Delta \bar{V}^0(\text{Gly})$ . С учетом (2) и (4) получаем для углеводородных радикалов

$$\Delta \bar{V}^0(\text{CH}_2) = 0,2I - 0,4I = -0,2I. \quad (5)$$

$$\Delta \bar{V}^0(\text{CH}) = -0,1I, \quad (6)$$

$$\Delta \bar{V}^0(\text{CH}_3) = -0,3I, \quad (7)$$

$$\text{R}_{\alpha\text{-Ala}}: \Delta \bar{V}^0(\text{CHCH}_3) = -0,1I - 0,3I = -0,4I. \quad (8)$$

Теперь находим вклад заряженных групп

$$\Delta \bar{V}^0(\text{NH}_3^+, \text{COO}^-) = \Delta \bar{V}^0(\text{Gly}) - \Delta \bar{V}^0(\text{CH}_2) = 1,6I^{0,5} + 0,4I - (-0,2I) = AI^{0,5} + 0,6I \quad (9)$$

и вклад радикала серина

$$\begin{aligned} \text{R}_{\text{Ser}}: \Delta \bar{V}^0(\text{CHCH}_2\text{OH}) &= \Delta \bar{V}^0(\text{Ser}) - \Delta \bar{V}^0(\text{NH}_3^+, \text{COO}^-) = AI^{0,5} + 0,7I - (AI^{0,5} + 0,6I) = \\ &= 0,1I = (-0,1 - 0,2 + 0,4)I. \end{aligned} \quad (10)$$

В соответствии с (5)—(8) парциальные объемы углеводородных радикалов аминокислот уменьшаются в водных растворах солей по сравнению с водой, о чем уже было сказано в начале статьи со ссылкой на работы [1, 2], в которых расчеты проведены по точкам, т.е. для каждой концентрации соли.

Однако уравнение (2) имеет особенность, которая позволяет предложить новый вариант аддитивно-групповой схемы. Как уже отмечалось, параметр  $A$  в (2) не зависит от вида аминокислоты и не сильно зависит от вида соли. Разумно предположить, что связанный с  $A$  вклад определяется общим для всех аминокислот "фрагментом", включающим группы  $\text{NH}_3^+$  и  $\text{COO}^-$  (сравнить с (9))

$$\Delta \bar{V}^0(\text{NH}_3^+, \text{COO}^-) = \Delta \bar{V}^0(A) = AI^{0,5}. \quad (11)$$

Если справедливо соотношение (11), то

$$\Delta \bar{V}^0(\text{R}) = \Delta \bar{V}^0(\text{B}) = BI. \quad (12)$$

Дальнейшая детализация учитывает, что метиленовая группа глицина содержит два эквивалентных атома водорода

$$R_{\text{Gly}}: \Delta \bar{V}^0(\text{CH}_2) = 0,4I = (0,2 + 0,2)I, \quad \Delta \bar{V}^0(\text{CH}) = 0,2I, \quad (13)$$

тогда получаем

$$R_{\alpha\text{-Ala}}: \Delta \bar{V}^0(\text{CHCH}_3) = 0,2I = (0,2 + 0)I, \quad \Delta \bar{V}^0(\text{CH}_3) = 0. \quad (14)$$

$$R_{\text{Ser}}: \Delta \bar{V}^0(\text{CHCH}_2\text{OH}) = 0,7I = (0,2 + 0 + 0,5)I, \quad \Delta \bar{V}^0(\text{CH}_2) = 0. \quad (15)$$

В новом варианте аддитивно-групповой схемы парциальные объемы радикалов аминокислот *увеличиваются* в водных растворах солей, а для групп  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$  боковой цепи не зависят от концентрации соли (уравнения (13)—(15)).

В работе [11] определены парциальные объемы аминокислоты  $\beta$ -аланина в воде и растворах хлорида натрия. Значения  $\Delta \bar{V}^0$  из данных [11] составляют  $1,87 \text{ см}^3/\text{моль}$  ( $1m \text{ NaCl}$ ) и  $3,11 \text{ см}^3/\text{моль}$  ( $2m \text{ NaCl}$ ). Этим величинам соответствует уравнение

$$\Delta \bar{V}^0 = 1,6I^{0,5} + (0,39 \pm 0,06)I, \quad s = 0,14 \text{ см}^3/\text{моль}. \quad (16)$$

Две метиленовые группы  $\beta$ -аланина дают такой же вклад в  $\Delta \bar{V}^0$  как группа  $\text{CH}_2$  глицина (уравнение (13)), т.е. разность  $\Delta \bar{V}^0(R_{\beta\text{-Ala}}) - \Delta \bar{V}^0(R_{\text{Gly}})$  равна 0. Можно предположить, что метиленовые группы  $\beta$ -аланина отличаются друг от друга\*. Та, что связана с положительно заряженной группой  $\text{NH}_3^+$ , испытывает ее сильное влияние и похожа на группу  $\text{CH}_2$  глицина. Другая группа, связанная с  $\text{COO}^-$ , мало подвержена ее влиянию и скорее похожа на группу  $\text{CH}_2$  боковой цепи. Можно полагать, что для  $\alpha, \omega$ -аминокислот  $\text{NH}_3^+(\text{CH}_2)_n\text{COO}^-$  вклад в  $\Delta \bar{V}^0$  от углеводородной цепочки будет иметь постоянную величину. Значит, уравнения (3) и (16) можно использовать и для этих соединений. Уравнение (2) позволяет далее найти парциальные объемы  $\alpha, \omega$ -аминокислот в водно-солевых растворах. Значения  $\bar{V}_W^0$  приведены, например, в работе [14] для  $n = 2-5$ .

В работах [14, 15] показано, что  $\bar{V}_W^0$  метиленовой группы, расположенной между  $\text{NH}_3^+$  и  $\text{COO}^-$ , меньше, чем метиленовой группы в боковой цепи. Рис. 3 иллюстрирует поведение указанных групп в водно-солевых системах в рамках нашего подхода (сплошные линии) и подхода, используемого в литературе (штриховые линии). Данные для воды взяты из [14]. Объемная характеристика весьма чувствительна к гидрофобным эффектам и связанным с ними структурным перестройкам. Разный вид зависимостей на рис. 3 предполагает, следовательно, разную структурную интерпретацию\*\*.

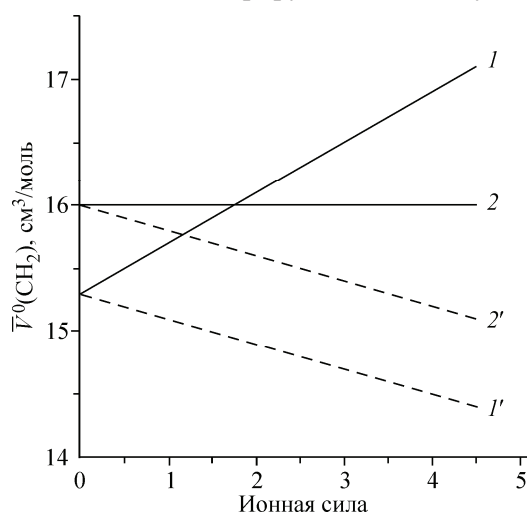


Рис. 3. Парциальные объемы метиленовой группы глицина (1, 1') и метиленовой группы боковой цепи аминокислот (2, 2'). Схема, предложенная в литературе (1, 2), наша схема (1', 2')

\* Подчеркнем, что речь идет о такой характеристике, как  $\Delta \bar{V}^0$ , т.е. об изменении парциального объема при добавлении к воде соли.

\*\* Если предположить, что линии 1 и 2 на рис. 3 должны пересекаться при более высокой концентрации соли, то группа  $\text{CH}_2$  глицина в воде будет иметь примерно на  $1 \text{ см}^3/\text{моль}$  меньшее значение  $\bar{V}_W^0$ , т.е.  $\approx 14,3 \text{ см}^3/\text{моль}$ .

Структурное состояние воды вблизи гидрофильных и гидрофобных групп (частиц) различается: во втором случае вода более структурирована. Особенности гидратации четко проявляются в объемных характеристиках: перекрывание сфер гидратации при взаимодействии гидрофобной частицы с гидрофильной должно приводить к  $\Delta\bar{V}^0 < 0$  [ 1, 2, 16—19 ]. Мы получили для метиленовой группы глицина  $\Delta\bar{V}^0 > 0$ . Такому изменению объема соответствует поведение гидрофильной группы\*. Для углеводородных радикалов боковой цепи аминокислот мы получили  $\Delta\bar{V}^0 = 0$ , что можно охарактеризовать как некоторый промежуточный вариант (группа не является ни гидрофильной, ни гидрофобной). Более детальная расшифровка полученных данных на молекулярно-структурном уровне пока представляется затруднительной.

Обсудим особенности гидратации заряженных групп  $\text{NH}_3^+$  и  $\text{COO}^-$ . Проведем сравнение в двух направлениях: а) сопоставим схему, предложенную в литературе, и нашу схему (на примере водного раствора NaCl) и б) сопоставим наш подход для водных растворов NaCl и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Исследуемой характеристикой будет такой структурно значимый параметр, как гидратное число.

Согласно [ 20, 21 ], для нашего случая можно записать

$$\Delta\bar{V}^0 + \bar{V}_W^0 = V_{\text{in}} + n_h(V_h - \bar{V}_W), \quad (17)$$

где  $V_{\text{in}}$  — объем (эффективный) частицы в растворе;  $n_h$  — гидратное число аминокислоты;  $V_h$  — молярный объем воды в гидратной оболочке частицы;  $\bar{V}_W$  — парциальный объем воды в водном растворе соли. Концентрационно зависимыми переменными в (17) являются  $\Delta\bar{V}^0$ ,  $n_h$  и  $\bar{V}_W$ .

Величина  $\bar{V}_W^0(\text{NH}_3^+, \text{COO}^-) = 27,8 \text{ см}^3/\text{моль}$  получена из соотношения

$$\bar{V}_W^0(\text{NH}_3^+, \text{COO}^-) = \bar{V}_W^0(\text{Gly}) - \bar{V}_W^0(\text{CH}_2), \quad (18)$$

где  $\bar{V}_W^0(\text{CH}_2) = 15,3 \text{ см}^3/\text{моль}$  [ 14 ].

Величина  $V_{\text{in}}(\text{NH}_3^+, \text{COO}^-) = 38,9 \text{ см}^3/\text{моль}$  получена из соотношения

$$V_{\text{in}}(\text{NH}_3^+, \text{COO}^-) = V_{\text{in}}(\text{Gly})V_W(\text{NH}_3^+, \text{COO}^-)/V_W(\text{Gly}), \quad (19)$$

где  $V_{\text{in}}(\text{Gly}) = 51,9 \text{ см}^3/\text{моль}$  [ 21 ];  $V_W$  — ван-дер-ваальсовы объемы [ 22 ] заряженных групп ( $30,33 \text{ см}^3/\text{моль}$ ) и глицина ( $40,42 \text{ см}^3/\text{моль}$ ).

Гидратное число ( $\text{NH}_3^+, \text{COO}^-$ ) в водном растворе ( $\Delta\bar{V}^0 = 0$  в уравнении (17)) принимали как для глицина [ 21 ], равным четырем,  $\bar{V}_W = 18,07 \text{ см}^3/\text{моль}$ . Тогда из соотношения (17) получаем  $V_h = 15,29 \text{ см}^3/\text{моль}$ .

Для водного раствора хлорида натрия  $\Delta\bar{V}^0(\text{NH}_3^+, \text{COO}^-)$  рассчитывали по (9) или (11) при  $A = 1,6$ . Парциальные объемы воды  $\bar{V}_W$  в водном растворе NaCl рассчитывали исходя из уравнения  $\phi(m, T)$  для кажущегося объема соли (см. табл. 5 в [ 23 ])\*\*. Приведем результаты расчета для  $4,5m$  NaCl ( $\bar{V}_W = 17,90 \text{ см}^3/\text{моль}$ ). Если использовать (9), получим  $n_h = 1,92$ . Для нашего соотношения (11) будет  $n_h = 2,95$ ; таким образом, мы наблюдаем не столь сильное обезвоживание заряженных групп (теряется одна молекула из четырех), тогда как в альтернативном варианте (9) теряется целых две молекулы воды из четырех.

В структурном отношении интересно выяснить, как добавки NaCl влияют на гидратные числа  $\text{NH}_3^+$  и  $\text{COO}^-$ . Гидратное число, равное четырем, в воде можно распределить как  $\text{NH}_3^+(2)$ ,  $\text{COO}^-(2)$  или как  $\text{NH}_3^+(3)$  и  $\text{COO}^-(1)$ . С учетом заключения о более слабой гидратации анионов [ 24—26 ] второй вариант представляется предпочтительным. Тогда  $n_h = 2,95$  в  $4,5m$  NaCl соответствует полному обезвоживанию группы  $\text{COO}^-$ .

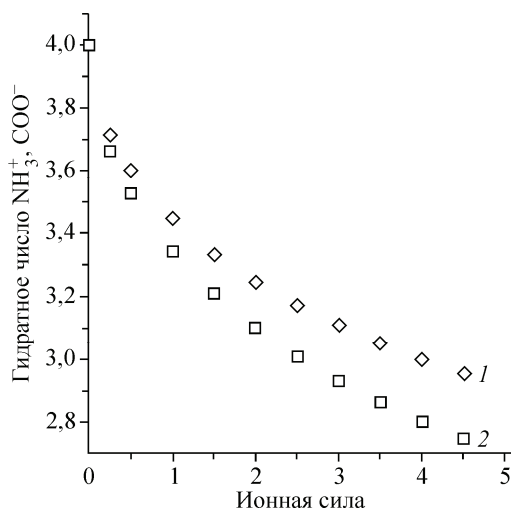
Сопоставим поведение  $\text{NH}_3^+$ ,  $\text{COO}^-$  в двух обсуждаемых солевых системах. Для водного сульфата натрия наш подход дает

$$\Delta\bar{V}^0(\text{NH}_3^+, \text{COO}^-) = 1,9I^{0,5}. \quad (20)$$

\* Для серина  $\Delta\bar{V}^0(\text{OH}) = 0,5I$  (см. уравнение (15)). В случае глицина  $\Delta\bar{V}^0(\text{CH}_2) = 0,4I$  (уравнение (13)).

\*\* Напомним, что для 1-1 электролитов ионная сила совпадает с моляльностью.

Рис. 4. Гидратное число  $\text{NH}_3^+$ ,  $\text{COO}^-$  в водных растворах  $\text{NaCl}$  (1) и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (2)



Парциальный объем воды в водном растворе рассчитывали исходя из уравнения для кажущегося объема соли [23]. Результаты показаны на рис. 4. При одинаковой ионной силе гидратное число заряженных групп в водном растворе сульфата лишь несколько меньше, чем в водном растворе хлорида.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yuan Q., Li Z.-F., Wang B.-H. // J. Chem. Thermodyn. – 2006. – **38**. – P. 20 – 33.
2. Singh S.K., Kishore N. // J. Sol. Chem. – 2003. – **32**. – P. 117 – 135.
3. Marcus Y. // J. Sol. Chem. – 1994. – **23**. – P. 831 – 848.
4. Leyendekkers J.V. // J. Chem. Faraday Trans. I. – 1983. – **79**. – P. 1123 – 1134.
5. Islam M.N., Wadi R.K. // J. Bangladesh Chem. Soc. – 1994. – **7**. – P. 206 – 211.
6. Wadi R.K., Ramasami P. // J. Chem. Faraday Trans. – 1997. – **93**. – P. 243 – 247.
7. Ide M., Maeda Y., Kitano H. // J. Phys. Chem. B. – 1997. – **101**. – P. 7022 – 7026.
8. Королев В.П. // Журн. структур. химии. – 2010. – **51**. – С. 509 – 517.
9. Humphrey R.S., Hedwig G.R., Watson I.D., Malcolm G.N. // J. Chem. Thermodyn. – 1980. – **12**. – P. 595 – 603.
10. Yan Z., Wang J., Liu W., Lu J. // Thermochim. Acta. – 1999. – **334**. – P. 17 – 27.
11. Ogawa T., Mizutani K., Yasuda M. // Bull. Chem. Soc. Jpn. – 1984. – **57**. – P. 2064 – 2068.
12. Liu C., Ren C. // J. Chem. Eng. Data. – 2009. – **54**. – P. 3296 – 3299.
13. Jáklí Gy. // J. Chem. Thermodyn. – 2007. – **39**. – P. 1589 – 1600.
14. Romero C.M., Cadena J.C. // J. Sol. Chem. – 2010. – **39**. – P. 1474 – 1483.
15. Hakin A.V., Liu J.L. // J. Sol. Chem. – 2006. – **35**. – P. 1157 – 1171.
16. Desnoyers J.E., Arel M., Perron G., Jolicoeur C. // J. Phys. Chem. – 1969. – **73**. – P. 3346 – 3351.
17. Perron G., Desrosiers N., Desnoyers J.E. // Canad. J. Chem. – 1976. – **54**. – P. 2163 – 2183.
18. Mishra A.K., Prasad K.P., Ahluwalia J.C. // Biopolymers. – 1983. – **22**. – P. 2397 – 2409.
19. Mishra A.K., Ahluwalia J.C. // J. Phys. Chem. – 1984. – **88**. – P. 86 – 92.
20. Королев В.П. // Журн. структур. химии. – 2011. – **52**. – С. 759 – 763.
21. Королев В.П., Серебрякова А.Л. // Журн. структур. химии. – 2011. – **52**. – С. 1143 – 1147.
22. Lepori L., Gianni P. // J. Sol. Chem. – 2000. – **29**. – P. 405 – 447.
23. Lo Surdo A., Alzola E.M., Millero F.J. // J. Chem. Thermodyn. – 1982. – **14**. – P. 649 – 662.
24. Hindman J.C. // J. Chem. Phys. – 1962. – **36**. – P. 1000 – 1015.
25. Leyendekkers J.V. // J. Phys. Chem. – 1986. – **90**. – P. 5449 – 5455.
26. Zavitsas A. // J. Phys. Chem. B. – 2001. – **105**. – P. 7805 – 7817.