

Г.И. Егоров, Д.М. Макаров, А.М. Колкер

Геннадий Ильич Егоров (✉), Дмитрий Михайлович Макаров, Аркадий Михайлович Колкер
 Лаборатория структуры и динамики молекулярных и ион-молекулярных растворов,
 Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, 153045, Иваново, ул. Академическая, д. 1,
 Российская Федерация
 E-mail: gie@isc-ras.ru (✉), dmm@isc-ras.ru, amk@isc-ras.ru

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ИЗБЫТОЧНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СМЕСИ ВОДА + ЭТИЛЕНДИАМИН

Рассчитаны изменения в избыточной мольной энергии Гиббса $\Delta_{p_0 \rightarrow p} G_m^E$, избыточной мольной энтропии $\Delta_{p_0 \rightarrow p} S_m^E$ и избыточной мольной энтальпии $\Delta_{p_0 \rightarrow p} H_m^E$ в смеси вода + этилендиамин при повышении давления до 100 МПа в интервале температур 288.15-323.15 К. Обнаружено, что зависимости $\Delta_{p_0 \rightarrow p} G_m^E$, $\Delta_{p_0 \rightarrow p} S_m^E$ и $\Delta_{p_0 \rightarrow p} H_m^E$ от мольной доли этилендиамина (x_2) характеризуются наличием экстремумов. Обнаружена корреляция диаграммы плавления смеси и изменения в избыточной мольной энтропии $\Delta_{p_0 \rightarrow p} S_m^E$ от состава.

Ключевые слова: вода, этилендиамин, смеси неэлектролитов, высокое давление, избыточные термодинамические характеристики

G.I. Egorov, D.M. Makarov, A.M. Kolker

Gennadiy I. Egorov (✉), Dmitriy M. Makarov, Arkadiy M. Kolker
 Laboratory of structure of dynamics of molecular and ion-molecular solutions
 G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences,
 153045 Ivanovo, Akademicheskaya Str., 1, Russia
 E-mail: gie@isc-ras.ru (✉), dmm@isc-ras.ru, amk@isc-ras.ru

INFLUENCE OF PRESSURE ON EXCESS THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF WATER + ETHYLENEDIAMINE MIXTURE

The variations of excess molar thermodynamic characteristics: Gibbs energy $\Delta_{p_0 \rightarrow p} G_m^E$, entropy $\Delta_{p_0 \rightarrow p} S_m^E$ and enthalpy $\Delta_{p_0 \rightarrow p} H_m^E$ for the mixture of water + ethylenediamine in the temperature range of 288.15-323.15 K and pressures increase up to 100 MPa were calculated. Concentration dependences of $\Delta_{p_0 \rightarrow p} G_m^E$, $\Delta_{p_0 \rightarrow p} S_m^E$ and $\Delta_{p_0 \rightarrow p} H_m^E$ versus mole fraction of ethylenediamine (x_2) at all values of pressure studied were characterized by the presence of maxima. A correlation of the mixture melting diagram and change in excess molar entropy from concentration ($\Delta_{p_0 \rightarrow p} S_m^E = f(x_2)$) was found.

Key words: water, ethylenediamine, non-electrolytes mixtures, high pressure, excess thermodynamic parameters

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость исследования межмолекулярных взаимодействий и структурных свойств водных растворов неэлектролитов различной природы обусловлена их важной ролью в природе, науке и современных технологиях. Несмотря на широкое использование в промышленности и лабораторной практике, изученность многих бинарных смесей остается достаточно слабой, а поиск параметров жидкофазных систем, эффективно

отражающих как особенности межмолекулярных взаимодействий, так и структурные изменения в индивидуальных растворителях и их растворах, является актуальной задачей.

Этилендиамин (1,2-диаминоэтан, ЭДА) широко применяется в нефтехимической промышленности, при производстве красителей, эмульгаторов, стабилизаторов латексов, антиокислительных присадок к моторным маслам, пластификаторов, фунгицидов и лекарственных препаратов.

Является сильным основанием, с водой образует два гидратных комплекса [1, 2]. Молекула ЭДА включает две аминогруппы $-\text{NH}_2$, которые способны участвовать в образовании водородной связи, и в ряде работ [3-8] предполагают, что жидкий этилендиамин, как и вода, обладает пространственной сеткой водородных связей, хотя сетка Н-связей у него менее развита по сравнению с водой. В твердом виде ЭДА обладает трехмерной сеткой водородных связей, о чем свидетельствуют данные рентгеноструктурного анализа [9]. Ранее также было показано, что в ЭДА внутримолекулярная водородная связь играет намного меньшую роль по сравнению с ее влиянием в этиленгликоле [6].

Избыточные мольные объемы V_m^E смеси,

$$V_m^E = V_m - x_1 V_1^o - x_2 V_2^o, \quad (1)$$

где V_m – мольный объем смеси, V_1^o , x_1 , V_2^o , x_2 – мольный объем чистых компонентов и их мольные доли (индекс 1 относится к воде, индекс 2 – к этилендиамину), были рассчитаны непосредственно из экспериментальных данных

$$V_m^E = x_1 M_1 (1/\rho - 1/\rho_1) + x_2 M_2 (1/\rho - 1/\rho_2), \quad (2)$$

где M_1 , ρ_1 и M_2 , ρ_2 – молярные массы, плотности воды и этилендиамина соответственно, ρ – плотность смеси. Погрешность в определении избыточных мольных объемов при атмосферном давлении составила не более $\pm 0,02 \text{ см}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$, при

повышении давления, соответственно, возростала до $\pm 0,04 \text{ см}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$.

Величины V_m^E были описаны уравнением Редлиха-Кистера [10].

$$V_m^E = x_2 (1 - x_2) \sum_{i=0}^{i=n} A_i (1 - 2x_2)^i \quad (3)$$

Оптимальная степень n уравнения (3) определялась стандартным отклонением (σ), которое рассчитывалось как:

$$\sigma = \left[\sum (V_{\text{exp}}^E - V_{\text{cal}}^E)^2 / (N - (n+1)) \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где N – общее число экспериментальных точек, а $(n+1)$ – число используемых коэффициентов (A_i) уравнения (3). Рассчитанные коэффициенты (A_i) и среднеквадратичные отклонения (σ) для каждой температуры приведены в таблице.

Избыточные мольные объемы V_m^E использовались для расчета изменений избыточных мольных энергий Гиббса $\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E$, избыточных мольных энтропий $\Delta_{P_0 \rightarrow P} S_m^E$, избыточных мольных энтальпий $\Delta_{P_0 \rightarrow P} H_m^E$ [11-15].

Для вычисления величин $\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E$ значения избыточных мольных объемов V_m^E каждого состава были обработаны полиномом второй степени по давлению.

$$\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E = G_{m(P)}^E - G_{m(P_0)}^E = \int_{P_0}^P V_m^E dP \quad (5)$$

Таблица

Коэффициенты A_i ($\text{см}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$) уравнения (3) и стандартные отклонения σ (V_m^E) ($\text{см}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$)
Table. The coefficients A_i ($\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$) of the equation (3) and standard deviation σ (V_m^E) ($\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$)

A_i	Т, К	P, МПа					
		0,10	10,0	25,0	50,0	75,0	100,0
A_0	288,15	-8,102	-7,847	-7,470	-6,953	-6,556	-6,246
	298,15	-8,072	-7,805	-7,421	-6,893	-6,480	-6,163
	308,15	-8,067	-7,793	-7,428	-6,903	-6,467	-6,067
	323,15	-8,096	-7,809	-7,450	-6,899	-6,438	-6,063
A_1	288,15	-3,575	-3,465	-3,340	-3,059	-2,763	-2,458
	298,15	-3,185	-3,096	-3,014	-2,777	-2,463	-2,161
	308,15	-3,094	-3,021	-2,879	-2,630	-2,364	-2,245
	323,15	-2,891	-2,844	-2,756	-2,627	-2,416	-2,153
A_2	288,15	1,780	1,848	1,916	2,189	2,505	2,554
	298,15	1,643	1,672	1,630	1,707	1,787	1,681
	308,15	1,688	1,669	1,607	1,634	1,680	1,284
	323,15	1,933	1,908	1,957	1,830	1,815	1,854
A_3	288,15	4,258	4,176	4,111	3,919	3,795	3,755
	298,15	3,678	3,611	3,637	3,494	3,251	3,086
	308,15	3,718	3,695	3,641	3,449	3,159	3,091
	323,15	3,331	3,343	3,359	3,379	3,162	2,809
A_4	288,15	1,286	1,283	1,362	1,205	0,882	0,835
	298,15	1,366	1,419	1,570	1,625	1,608	1,800
	308,15	0,886	0,962	1,142	1,260	1,347	2,007
	323,15	0,288	0,347	0,345	0,613	0,765	0,902
$\sigma V_m^E / (\text{см}^3 \cdot \text{моль}^{-1})$	288,15	0,019	0,019	0,018	0,019	0,020	0,018
	298,15	0,019	0,019	0,017	0,016	0,016	0,015
	308,15	0,022	0,021	0,020	0,019	0,019	0,015
	323,15	0,018	0,017	0,016	0,013	0,012	0,013

Изменения избыточных мольных энтропий $\Delta_{P_0 \rightarrow P} S_m^E$ находили обработкой величин $\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E$ полиномом второй степени по температуре.

$$\Delta_{P_0 \rightarrow P} S_m^E = S_{m(P)}^E - S_{m(P_0)}^E = -(\partial \Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E / \partial T)_{P,x} = - \int_{P_0}^P (\partial V_m^E / \partial T)_{P,x} dP \quad (6)$$

Изменения энтальпии смешения из-за увеличения давления $\Delta_{P_0 \rightarrow P} H_m^E$ рассчитывали как

$$\Delta_{P_0 \rightarrow P} H_m^E = H_{m(P)}^E - H_{m(P_0)}^E = (G_{m(P)}^E - G_{m(P_0)}^E) + T(S_{m(P)}^E - S_{m(P_0)}^E) = \int_{P_0}^P [V_{m(P)}^E - T(\partial V_m^E / \partial T)_{P,x}] dP \quad (7)$$

Максимальная погрешность в определении $\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E$ не превышала ± 1 Дж·моль⁻¹, погрешность $\Delta_{P_0 \rightarrow P} S_m^E$ составляла $\pm 0,015$ Дж·К⁻¹·моль⁻¹, $\Delta_{P_0 \rightarrow P} H_m^E$ энтальпий – ± 6 Дж·моль⁻¹.

Межмолекулярное взаимодействие смешанного растворителя вода + этилендиамин определяется, в основном, водородными связями, и зависит от энергии и количества Н-связей. Потенциально для образования водородной связи молекула ЭДА может являться донором четырех протонов и акцептором двух неподеленных пар электронов, но каждая молекула ЭДА, как правило, максимально образует только четыре относительно прочные водородные связи [4, 7, 16].

Также в ходе изменения состава смеси может изменяться и конформационное состояние молекул этилендиамина. Известно, что если твердый этилендиамин представлен, в основном, *транс*-конформацией [9], и в этом состоянии ЭДА образует цепи [17], связанные между собой Н-Н...Н связью, то жидкое состояние состоит из нескольких конформеров, со значительным преобладанием также *транс*-конформеров [16], хотя конформационное состояние молекулы ЭДА зависит от ее окружения, например, в инертной среде подавляющее их большинство находится в *гош*-форме [7, 18-19]. В растворах при температурах, близких к плавлению или ниже, этилендиамин, более вероятно, находится в конфигурации близкой к *транс*-конфигурации, т.е. сохраняет пространственную сетку водородных связей, присущую твердому ЭДА. Но как было показано ранее [5], в смеси с водой в области составов умеренных и высоких концентраций конформационное поведение ЭДА аналогично поведению его в состоянии беспримесной жидкости, т.е. с преобладанием *транс*-конформеров, а при существенном разбавлении ЭДА водой наблюдается повышение (до $\approx 30\%$) содержания *гош*-конформеров.

В смесях с водой группы -NH₂ молекул ЭДА участвуют в образовании водородных связей

как с молекулами воды, так и с молекулами ЭДА. Выбор партнера образования водородных связей определяется энергией Н-связи, соотношением компонентов, упаковкой и энергией активации перехода одной формы конформации ЭДА в другую. Образование Н-связи ЭДА с молекулами воды может происходить как за счет неподеленной пары атома азота, так и за счет протонов аминогруппы (в этом случае Н-связь на ~ 8 кДж·моль⁻¹ менее прочная [8]). В зависимости от соотношения молекул компонентов, молекула воды может выступать как донор (двойной или одинарный) и как акцептор протонов. Например, в смесях с малыми концентрациями воды молекулы H₂O будут выступать одновременно как донор и как акцептор протонов, образуя водородные связи с двумя молекулами ЭДА. Энергия Н-связи в этом случае за счет поляризации молекул H₂O будет выше, чем в случае, когда молекула H₂O является или двойным донором, или акцептором протонов [20]. При эквимолярном соотношении компонентов в смеси происходит образование Н-связанных цепочек с чередованием в них молекул H₂O и ЭДА. В смесях, богатых водой, молекулы H₂O будут стремиться образовывать более сильные водородные связи.

Ранее проведенные исследования свойств смесей вода + этилендиамин показали сильное межмолекулярное взаимодействие компонентов [5, 21-30]. Фазовая диаграмма плавления системы вода + этилендиамин [21, 30] свидетельствует, что в твердой фазе присутствуют два гидратных комплекса: конгруэнтно плавящееся при 283 К состава 1:1 и инконгруэнтно плавящееся при 263 К состава 2:1.

Величины избыточных мольных объемов отрицательны (рис. 1), что свидетельствует о более плотной упаковке образующейся смеси, т.е. формирование смеси вода + этилендиамин сопровождается либо более сильным взаимодействием между молекулами компонентов смеси по сравнению с таковым взаимодействием в индивидуальных растворителях, либо при образовании смеси формируется большее количество межмолекулярных связей. Зависимость $V_m^E = f(x_2)$ характеризуется наличием минимума. Величины V_m^E очень слабо зависят от температуры во всем изученном интервале давлений (рис. 1б). Малая зависимость V_m^E от температуры, объясняется именно с сильным взаимодействием между компонентами. Увеличение температуры способствует увеличению подвижности и гибкости молекул ЭДА, способствует снятию стерических препятствий для образования дополнительных, как межмолекулярных, так и внутримолекулярных связей, в результате

которых, как видно, осуществляется некоторая компенсация увеличения объема от температуры. Как видно из рис. 1, рост температуры и давления в пределах изученных параметров не приводят к заметному смещению минимума на зависимости $V_m^E = f(x_2)$ – смещения находятся в пределах погрешности.

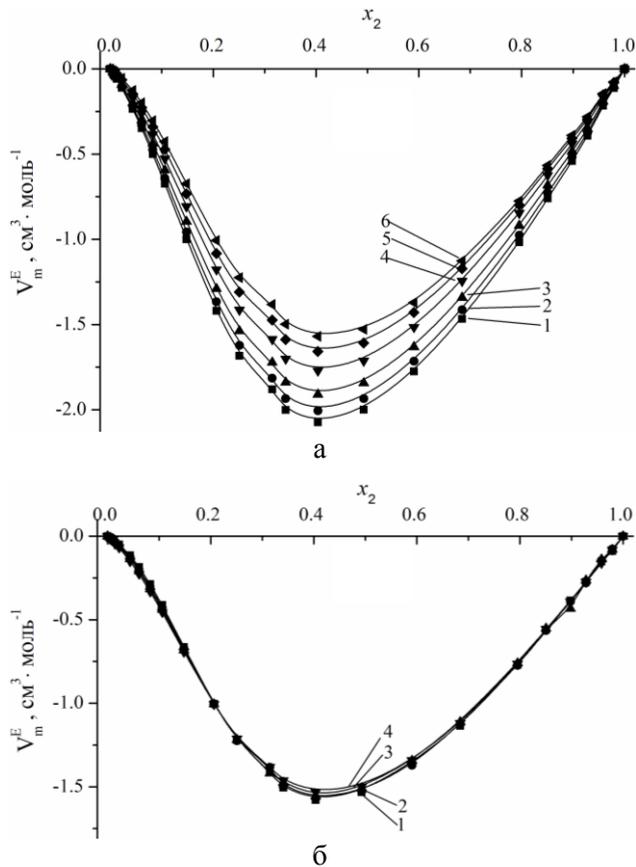


Рис. 1. Избыточные мольные объемы, V_m^E , смеси вода + этилендиамин в зависимости от мольной доли x_2 : (а) при 298,15К и следующих давлениях: (1 – 0,10 МПа, 2 – 10 МПа, 3 – 25 МПа, 4 – 50 МПа, 5 – 75 МПа, 6 – 100 МПа); (б) при 100 МПа и следующих температурах (1 – 288,15 К, 2 – 298,15 К, 3 – 308,15 К, 4 – 323,15 К)

Fig. 1. Dependences of excess molar volumes, V_m^E , of water + ethylenediamine mixture on x_2 : (a) at 298.15 K and various pressures: (1 – 0.10 MPa, 2 – 10 MPa, 3 – 25 MPa, 4 – 50 MPa, 5 – 75 MPa, 6 – 100 MPa); (b) at 100 MPa and various temperatures: (1 – 288.15 K, 2 – 298.15 K, 3 – 308.15 K, 4 – 323.15 K)

Зависимости изменения избыточной мольной энергии Гиббса $\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E$, как показано на рис. 2а, характеризуются наличием минимума в области составов $x_2 \approx 0.4$, и все величины являются отрицательными во всей области составов. Рост давления до 100 МПа приводит к увеличению абсолютных величин $\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E$ во всей области составов и при всех температурах. Как видно из рис. 2б изменения энтропийной составляющей $-(\Delta_{P_0 \rightarrow P} TS_m^E)$ в $\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E$ полностью компенсируются соответствующими изменениями энтальпийной состав-

ляющей. В связи с малой температурной зависимостью V_m^E (рис. 1б), также малой зависимостью от температуры отличаются и изменения в избыточной мольной энергии Гиббса $\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E$, т.е., величины $\Delta_{P_0 \rightarrow P} S_m^E$ являются малыми.

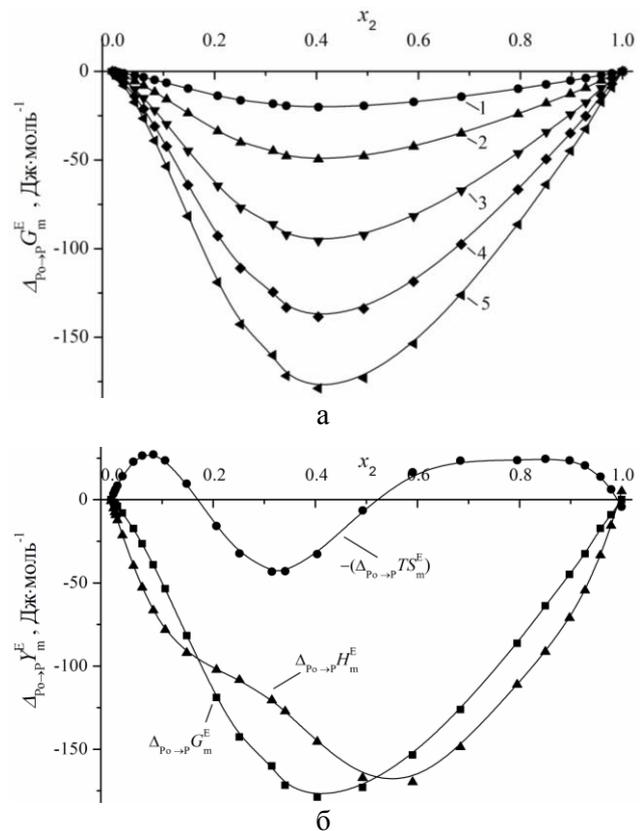


Рис. 2. (а) Изменения в избыточной мольной энергии Гиббса, $\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E$, в смеси вода + этилендиамин от мольной доли x_2 при 298,15К при повышении давления от 0,10 МПа до следующих значений: 1 – 10 МПа, 2 – 25 МПа, 3 – 50 МПа, 4 – 75 МПа, 5 – 100 МПа; (б) термодинамические вклады $-(\Delta_{P_0 \rightarrow P} TS_m^E)$ и $\Delta_{P_0 \rightarrow P} H_m^E$ в избыточной мольной энергии Гиббса, $\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E$, в смеси вода + этилендиамин при 298,15 К и 100 МПа

Fig. 2. (a) Changes in the excess molar Gibbs energy $\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E$ of water - ethylenediamine mixture on EDA mole fraction, x_2 , under the pressure rising from 0.10 MPa to the following magnitudes at 298.15 K: 1 – 10 MPa, 2 – 25 MPa, 3 – 50 MPa, 4 – 75 MPa, 5 – 100 MPa; (b) The thermodynamic contributions, $-(\Delta_{P_0 \rightarrow P} TS_m^E)$ and $\Delta_{P_0 \rightarrow P} H_m^E$, into the excess molar Gibbs energy $\Delta_{P_0 \rightarrow P} G_m^E$ of water - ethylenediamine mixture at 298.15 K and 100 MPa

Зависимости $\Delta_{P_0 \rightarrow P} S_m^E$ являются сложными (рис. 3) и характеризуются следующими экстремумами – минимумами в области малых и больших концентраций ЭДА, и максимумом в области $x_2 \approx 0,3-0,4$ м.д. Причем минимумы сформированы отрицательными величинами $\Delta_{P_0 \rightarrow P} S_m^E$, а максимум – положительными величинами. Данный вид зависимости $\Delta_{P_0 \rightarrow P} S_m^E = f(x_2)$ в смеси вода + этилендиамин (рис. 3а), вероятно, можно трактовать и как сильное проявление одного максимума в области $x_2 \approx 0,3-0,4$ на фоне вполне про-

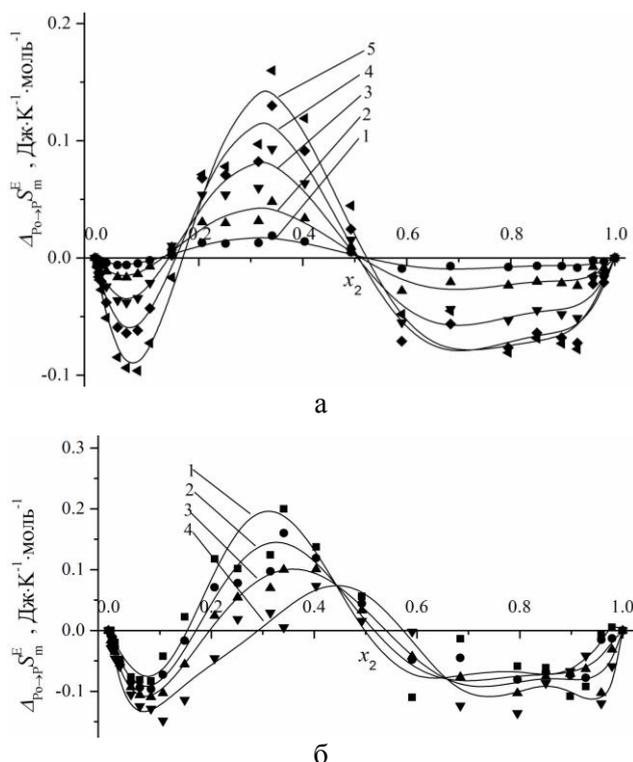


Рис. 3. Изменения в избыточной мольной энтропии $\Delta_{p_0 \rightarrow p} S_m^E$ в смеси вода + этилендиамин от мольной доли x_2 : (а) при 298,15 К при повышении давления с 0,10 МПа до следующих значений: (1 – 10 МПа, 2 – 25 МПа, 3 – 50 МПа, 4 – 75 МПа, 5 – 100 МПа); (б) при повышении давления от 0,10 МПа до 100 МПа и следующих температурах (1 – 288,15 К, 2 – 298,15 К, 3 – 308,15 К, 4 – 323,15 К).

Fig. 3. Changes in the excess molar entropy, $\Delta_{p_0 \rightarrow p} S_m^E$, of water + ethylenediamine mixture on EDA mole fraction, x_2 : a) under the pressure rising from 0.101 MPa to the following magnitudes at 278.15 K: (1 – 10 MPa, 2 – 25 MPa, 3 – 50 MPa, 4 – 75 MPa, 5 – 100 MPa); b) under the pressure rising from 0.10 to 100 MPa at different temperatures: (1 – 288.15 K, 2 – 298.15 K, 3 – 308.15 K, 4 – 323.15 K)

гнозируемого небольшого минимума, свидетельствующего о структурировании смеси при сжатии в случае отсутствия сильных взаимодействий между компонентами. Ранее было показано, что именно при $x_2 \approx 0,33$ и $x_2 \approx 0,5$ [21, 30] при низких температурах формируются два гидратных комплекса. Как видно из рисунка, сжатие смеси в целом приводит к увеличению порядка в смеси, однако в области образования гидрата вода-ЭДА состава 2:1 повышение давления способствует уменьшению создания порядка в смеси. Возможно, это является следствием того, что в межмолекулярном процессе образования Н-связей с молекулами воды участвует только одна аминогруппа, а другая – во внутримолекулярном процессе. Также возможно, что при этих составах в образовании сетки водородных связей с H_2O принимают участие одновременно две $-NH_2$ группы, но только с применением по одному атому водорода с каждой аминогруппы (например, образуются циклы).

Как видно из рис. 3б, повышение давления слегка смещает максимум в область составов, более богатых ЭДА. Приведенные зависимости $\Delta_{p_0 \rightarrow p} S_m^E = f(x_2)$ очень хорошо коррелируют с фазовой диаграммой плавления смеси вода + этилендиамин, представленной в работах [21, 30], где температура плавления смеси в интервале составов $0 < x_2 < 0,15$ сначала уменьшается, а затем повышается, проходит через максимум при $x_2 \approx 0,5$ и снова понижается, образуя минимум при $x_2 \approx 0,8$.

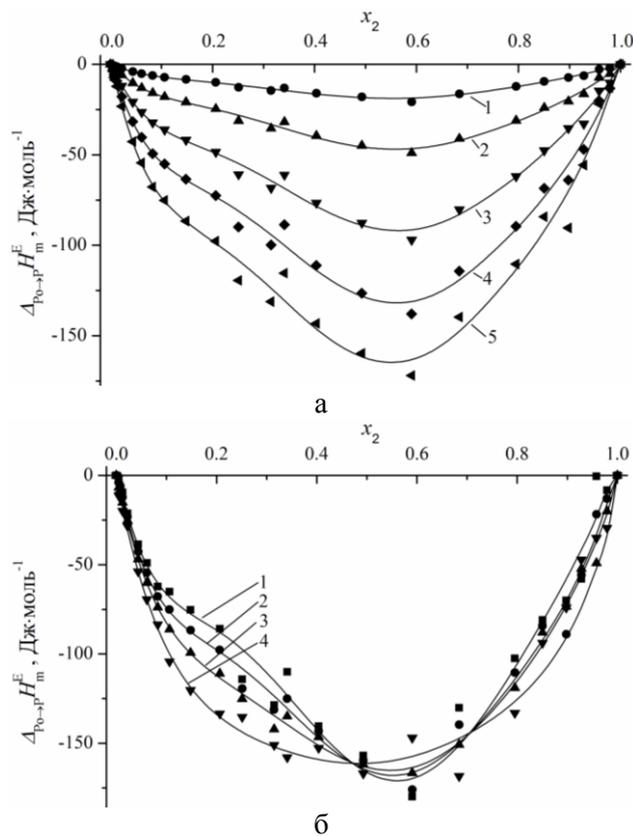


Рис. 4. Изменения в избыточной мольной энтальпии $\Delta_{p_0 \rightarrow p} H_m^E$ в смеси вода + этилендиамин от мольной доли x_2 : (а) при 298,15 К при повышении давления от 0,10 МПа до следующих значений: (1 – 10 МПа, 2 – 25 МПа, 3 – 50 МПа, 4 – 75 МПа, 5 – 100 МПа); (б) при повышении давления от 0,10 МПа до 100 МПа и следующих температурах (1 – 288,15 К, 2 – 298,15 К, 3 – 308,15 К, 4 – 323,15 К)

Fig. 4. Changes in the excess molar enthalpy $\Delta_{p_0 \rightarrow p} H_m^E$, of water + ethylenediamine mixture on EDA mole fraction, x_2 : a) under the pressure rising from 0.101 MPa to the following magnitudes at 298.15 K: (1 – 10 MPa, 2 – 25 MPa, 3 – 50 MPa, 4 – 75 MPa, 5 – 100 MPa); b) under the pressure rising from 0.10 to 100 MPa at different temperatures: (1 – 288.15 K, 2 – 298.15 K, 3 – 308.15 K, 4 – 323.15 K)

Как видно из рис. 4а, рост давления способствует тому, что энтальпии смешения H_m^E воды и этилендиамина при повышенных давлениях становятся более экзотермичными. Сжатие смеси вода + этилендиамин вызывает увеличение в ней упорядоченности, которая сопровождается образованием новых водородных связей. Изменение величины

H_m^E с ростом давления свидетельствует о том, что эндотермическая составляющая разрыва водородных связей в смеси меньше экзотермической составляющей образования новых Н-связей, если рассматривать данные изменения только как результат процессов «разрушения» или «образования» водородных связей. Это утверждение будет верным лишь при допущении, что удельная энергия водородной связи, образующаяся между молекулами, в этом интервале давлений не изменяется. Малое изменение $\Delta_{p_0 \rightarrow p} H_m^E$ от температуры (рис. 4б) свидетельствует о сильном межмолекулярном взаимодействии между молекулами воды и этилендиамина. Повышение температуры увеличивает дисперсию кривых $\Delta_{p_0 \rightarrow p} H_m^E = f(x_2)$ лишь в области составов, где наблюдается наибольшая концентрация гидратных комплексов вода-ЭДА состава 2:1.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №15-43-03092-р_центр_a и №15-43-03093-р_центр_a).

Измерения плотности при атмосферном давлении были выполнены на оборудовании центра коллективного пользования "Верхневолжский региональный центр физико-химических исследований".

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. / 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия. 1991. 432 с.; Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya. Short Chemical Handbook. 3th edn. L.: Khimiy. 1991. 432 p. (in Russian).
2. Огородников С.К., Лестева Т.М., Коган В.Б. Азеотропные смеси: Справочник. Л.: Химия. 1971. 848 с.; Ogorodnikov S. K., Lesteva T. M., Kogan V.B. Azeotrope mixtures: Handbook. L.: Khimiya. 1971. 848 p. (in Russian).
3. Wilson A.L. // Ind. Eng. Chem. 1935. V. 27. P. 867–871.
4. Cheng Y., Pager M., Jolicoeur C. // J. Phys. Chem. 1993. V. 97. P. 7359–7363.
5. Gubskaya A.V., Kusalik P.G. // J. Phys. Chem. A 2004. V. 108. P. 7165–7178.
6. Chang Y.-P., Su T.-M., Li T.-W., Chao I. // J. Phys. Chem. A 1997. V. 101. P. 6107–6117.
7. Буслаева М.Н., Карцев В.Н., Дудникова К.Т. // Ж. физ. химии. 1982. Т. 56. С. 1254–1255; Buslaeva M.N., Kartsev V.N., Dudnikova K.T. // Zhurn. Fizich. Khimii. 1982 V. 56. P. 1254–255 (in Russian).
8. Родникова М.Н., Исаев А.Н., Засыпкин С.А. // Коорд. химия. 1991. Т. 17. С. 1467–1472; Rodnikova M.N., Isaev A.N., Zasyrkin S.A. // Koord. Khim. 1991. V. 17. P. 1467–1472 (in Russian).
9. Jamet-Delcroix S., Pandraud H.G. // Comp. rend. Acad. Sc. Paris C. 1972. V. 274. P. 771–773.
10. Redlich O., Kister A.T. // Ind. Eng. Chem. 1948. V. 40. P. 345–348.
11. Егоров Г.И., Макаров Д.М., Колкер А.М. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2015. Т. 58. Вып. 1. С. 8–13; Egorov G. I., Makarov D. M., Kolker A.M. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2015. V. 58. N 1. P. 8–13 (in Russian).
12. Егоров Г.И., Макаров Д.М. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2012. Т. 55. Вып. 1. С. 81–84; Egorov G.I., Makarov D.M. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2012. V. 55. N 1. P. 81–84 (in Russian).
13. Егоров Г.И., Макаров Д.М. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2011. Т. 54. Вып. 11. С. 65–68; Egorov G.I., Makarov D.M. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2011. V. 54. N 11. P. 65–68 (in Russian).
14. Егоров Г.И., Макаров Д.М. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2010. Т. 53. Вып. 5. С. 45–48; Egorov G.I., Makarov D.M. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2010. V. 53. N 5. P. 45–48 (in Russian).
15. Егоров Г.И., Макаров Д.М. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2010. Т. 53. Вып. 6. С. 46–49; Egorov G.I., Makarov D.M. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2010. V. 53. N 6. P. 46–49 (in Russian).
16. Gubskaya A.V., Kusalik P.G. // J. Phys. Chem. A. 2004. V. 108. P. 7151–7164.
17. Родникова М.Н. // Журн. физ. химии. 1993. Т. 67. С. 275–280; Rodnikova M.N. // Zhurn. Fizich. Khimii. 1993. V. 67. P. 275–280 (in Russian).
18. Архипенко Н.В., Кийко С.М. // Ж. физ. химии, 2005. Т. 79. С. 374–376; Arkhipenko N.V., Kiyko S.M. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2005. V. 79. P. 305–307.
19. Королевич М.В., Сывчук В.В., Матвеева Н.А., Жбанков Р.Г., Ласточкина В.А., Френкель М.Л., Ладутько А.И., Петряев Е.П. // Ж. прикл. спект. 1987. Т. 46. № 4. С. 620–624; Korolevich M.V., Syvchuk V.V., Matveeva N.A., Zhbankov R.G., Lastochkina V.A., Frenkel M.L., Ladut'ko A.I., Petryaev E.P. // J. Appl. Spectr. 1987. V. 46. N 4. P. 400–403.
20. Hankins D., Moskowitz J.W., Stillinger F.H. // J. Chem. Phys. 1970. V. 53. P. 4544–4554.
21. Эльгорт М.С. // Журн. русск. хим-физ. общ-ва. 1929. Т. 61. С. 947–959; El'gort M.S. // Zhurn. Rusk. Khim-Fiz. Obshchestva 1929. V. 61. P. 947–959 (in Russian).
22. Kapadi U.R., Hundiwale D.G., Patil N.B., Lande M.K. // Fluid Phase Equilibria. 2003. V. 205. P. 267–274.
23. Saleh M.A., Akhtar S., Ahmed M.S. // J. Mol. Liq. 2005. V. 116. P. 147–156.
24. Усть-Качкинцев В.Ф. // Журн. физ. химии. 1935. Т. 6. С. 67–72; Ust'-Kachkintsev V.F. // Zhurn. Fizich. Khimii. 1935. V. 6. P. 67–72 (in Russian).
25. Saleh M.A., Ahmed M.S., Islam M.S. // Phys. Chem. Liq. 2002. V. 40. P. 477–490.
26. Ahmed N.Ch.-B., Negadi L., Mokbel I., Jose J. // J. Chem. Thermodyn. 2011. V. 43. P. 719–724.
27. Крестьянинов М.А., Титова А.Г., Зайчиков А.М. // Ж. физ. химии. 2014. Т. 88. С. 1939–1945; Krest'yaninov M.A., Titova A.G., Zaiyichikov A.M. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2014. V. 88. P. 2114–2120.
28. Карцев В.Н., Буслаева М.Н., Цепулин В.В., Дудникова Е.Т. // Ж. физ. химии. 1984. Т. 58. С. 2687–2691; Kartsev V.N., Buslaeva M.N., Tsepulin V.V., Dudnikova E.T. // Zhurn. Fizich. Khimii. 1984. V. 58. P. 2687–2691 (in Russian).
29. Родникова М.Н., Ястремский П.С., Харькин В.С., Дудникова Н.Т. // Изв. Академ. наук. Сер. хим. 1987. № 5. С. 1157–1160; Rodnikova M.N., Yastremskiy P.S., Khar'kin V.S., Dudnikova N.T. // Izv. Akad. Nauk. SSSR. Ser. Khim. 1987. N 5. P. 1157–1160 (in Russian).
30. de Guieu R., Rosso J.-C., Carbonnel L. // C. R. Acad. Sc. Paris C. 1978. V. 287. P. 495–498.