

УДК 541.8

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ВОДНЫХ РАСТВОРОВ АМИНОСПИРТОВ****А.Г. Титова<sup>1</sup>, М.А. Крестьянинов<sup>2</sup>, А.М. Зайчиков<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия*

E-mail: zam@fromru.com

<sup>2</sup>*Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия**Статья поступила 7 октября 2013 г.**С доработки — 27 февраля 2014 г.*

Рассчитаны термодинамические характеристики водных растворов аминспиртов, полученных путем замещения протонов аминогруппы моноэтаноламина алкильными радикалами и не образующих сетки водородных связей. Выявлены закономерности изменения структурных свойств исследуемых смесей. Корреляция энтропийных и энтальпийных характеристик систем вода—аминспирт с избыточными упаковочными коэффициентами свидетельствует о том, что универсальные взаимодействия определяют структурные и энергетические свойства водных растворов этих аминспиртов. Вид концентрационных зависимостей структурно-термодинамических характеристик в исследуемых системах оказался симбатен данным для смесей воды с апротонными амидами. Причины этого обсуждены путем сопоставления полученных результатов с нашими ранее опубликованными данными для водных растворов апротонных амидов.

**Ключевые слова:** внутреннее давление, межмолекулярные взаимодействия, термодинамические и структурные характеристики водных растворов аминспиртов, вода, апротонные амиды.

Аминспирты находят широкое применение в органической химии и промышленности [1]. Однако физико-химическая изученность их водных смесей остается достаточно низкой, а выявление и использование термодинамических характеристик, которые эффективно отражают параметры межмолекулярных взаимодействий и структурные изменения в таких системах, до сих пор представляет важную задачу химии растворов. Ранее нами было показано, что структурно-термодинамические свойства водных растворов неэлектролитов, образующих сетки Н-связей и не образующих их, имеют существенное различие [2—5]. Как известно, для образования пространственной сетки Н-связей в аминспиртах необходимо, чтобы в их молекулах было не меньше двух центров доноров и двух центров акцепторов протонов [6]. Диметилэтанолламин (ДМЭА) и диэтилэтанолламин (ДЭЭА), полученные путем замещения протонов аминогруппы моноэтаноламина алкильными радикалами, не удовлетворяют этому условию и не могут образовывать сетки водородных связей. В первой статье цикла будут рассмотрены структурно-термодинамические характеристики водных растворов таких аминспиртов, а во второй статье — соответствующие растворы самоассоциированных аминспиртов, образующих сетки Н-связей. В этой связи представляется актуальным на основе внутреннего давления рассчитать термодинамические свойства исследуемых смесей во всей области их составов для выявления особенностей их структурной организации.

Внутреннее давление ( $p_{\text{int}}$ ) редко используется для анализа структурных свойств растворов. Величина  $p_{\text{int}}$  характеризует изменение внутренней энергии раствора в процессе небольшого

изотермического расширения [ 7, 8 ] и может быть рассчитана из соотношения

$$p_{\text{int}} = -(\partial U / \partial V)_T = p - T \cdot (\partial p / \partial T)_V \approx -T \cdot \alpha / \beta_T, \quad (1)$$

где  $V$  — мольный объем;  $\alpha$  и  $\beta_T$  — коэффициенты изобарного (объемного) расширения и изотермического сжатия соответственно. Пренебрежение величиной  $p$  (атмосферное давление) в соотношении (1) представляется допустимым, поскольку дает погрешность в расчет  $p_{\text{int}}$  менее 0,1 % [ 9 ]. Коэффициенты термического расширения и изотермической сжимаемости при наличии данных по физико-химическим свойствам растворов вычисляли из уравнений

$$\alpha = 1/V(\partial V / \partial T)_P, \quad (2)$$

$$\beta_T = 1/(u^2 \rho) + \alpha^2 V T / C_p, \quad (3)$$

где  $u$  — скорость ультразвука;  $\rho$  — плотность;  $C_p$  — теплоемкость бинарных систем. Для расчета этих коэффициентов в исследуемых системах использовали данные работ [ 10—18 ].

В работе [ 19 ] отмечено, что хотя температурный коэффициент внутреннего давления  $(\partial p_{\text{int}} / \partial T)$  позволяет различать жидкости с разной молекулярной ассоциацией (с участием Н-связей и без их участия), его использование для изучения надмолекулярной организации жидких систем затруднено из-за неоднозначной связи этого параметра со структурой жидкости и ее состоянием. Нами показано [ 20, 21 ], что различие поведения зависимостей  $p_{\text{int}}(T)$  и коэффициентов  $\partial p_{\text{int}} / \partial T$ , отнесенных к их структурным характеристикам [ 7, 19 ], проясняется при расчете мольных величин специфической ( $U_{\text{sp}}$ ) и неспецифической ( $U_{\text{nsp}}$ ) составляющих межмолекулярного взаимодействия, использование которых для анализа структурных и термодинамических свойств индивидуальных и смешанных растворителей более корректно.

В рамках модели [ 8 ] неспецифическая составляющая  $U_{\text{nsp}}$  полной энергии межмолекулярного взаимодействия  $U_{\text{tot}}$  в одном моле раствора оценивается как

$$U_{\text{nsp}} = p_{\text{int}} V_m, \quad (4)$$

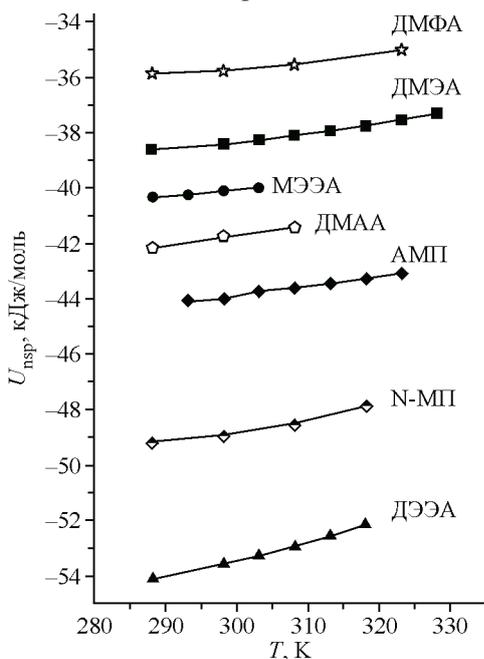
а соответствующая специфическая составляющая рассчитывается из

$$U_{\text{sp}} = U_{\text{tot}} - U_{\text{nsp}} = -\Delta H_v + RT + TV_m \alpha / \beta_T. \quad (5)$$

Энтальпия испарения растворов вычисляется из соотношения

$$\Delta H_v = [(1-X)\Delta H_v^1 + X\Delta H_v^2] - H^E, \quad (6)$$

где  $\Delta H_v^1$  и  $\Delta H_v^2$  — энтальпии испарения компонентов растворов, а  $H^E$  — их энтальпии, численные значения которых заимствованы из работ [ 23—25 ].

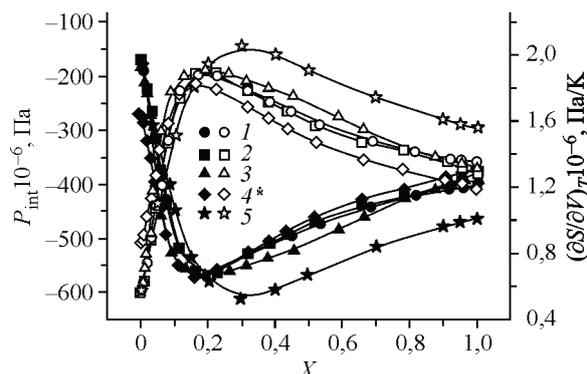


На рис. 1 представлены температурные зависимости вкладов  $U_{\text{nsp}}$  в полную энергию межмолекулярного взаимодействия в исследуемых аминокислотах. С ростом температуры неспецифические составляющие ослабевают симбатно, что ранее было установлено для апротонных амидов [ 20 ]. Для аминокислот, полученных путем замещения протонов аминогруппы моноэтанол-амин алкильными радикалами и не образующих сетки водородных связей, такое характерное поведение зависимости  $U_{\text{nsp}}(T)$  можно было бы предполагать. Однако выявить, что такой же наклон будет иметь температурная зависимость для моноэтилэтаноламина (МЭЭА)

Рис. 1. Температурная зависимость вкладов  $U_{\text{nsp}}$  в полную энергию межмолекулярного взаимодействия аминокислот и апротонных амидов.

МЭЭА — моноэтилэтаноламин, ДМЭА — диметилэтаноламин, АМП — 2-амино-2-метил-1-пропанол, ДЭЭА — диэтилэтаноламин; ДМФА — диметилформамид, ДМАА — диметилацетамид, N-МП — N-метилпирролидон

Рис. 2. Зависимость внутреннего давления (темные символы) и производной энтропии по объему (светлые символы) от состава водных растворов аминокислот и ДМФА при 298,15 К: МЭА (1), ДМЭА (2, 4) (4 — 313,15 К), ДЭА (3), ДМФА (5). ( $X$  — здесь и далее мольная доля органического неэлектролита)



и 2-амино-2-метил-1-пропанола (АМП), способных к образованию сеток Н-связей, *a priori* невозможно. Представляется интересным найти подтверждение отсутствия сеток Н-связей в этом и других исследуемых аминокислотах на структурно-термодинамических характеристиках их водных растворов, к обсуждению которых будут привлечены соответствующие параметры водных растворов апротонных амидов.

Полученные нами концентрационные зависимости внутреннего давления водных растворов аминокислот и апротонных амидов (здесь в качестве примера представлен раствор диметилформамида) имеют односторонний характер, причем с ростом молярного объема аминокислот экстремумы функций  $p_{\text{int}}(X)$  смещаются в сторону чистой воды (рис. 2). Аналогичным образом с ростом концентрации аминокислот изменяется энтропия растворов в процессе изотермического расширения [4], которую рассчитывали из соотношения

$$(\partial S/\partial V)_T = \alpha/\beta_T. \quad (7)$$

В водных растворах неэлектролитов эти энтропийные характеристики имеют экстремумы, соответствующие минимуму свободного объема или максимально плотной упаковке растворов, на которую указывают экстремумы функций  $p_{\text{int}}(X)$ . Говоря иначе, эти составы отражают концентрации растворов, при которых энтропия и, следовательно, упорядоченность водных систем наиболее чувствительна к изотермическому расширению. С другой стороны, установлено, что увеличение концентрации органических растворителей в воде всегда приводит к разрушению ее сетки водородных связей [22]. Например, в водных растворах ДМФА это происходит при мольной доле амида 0,3 [22]. В этой связи представляет интерес выявить и другие термодинамические характеристики, которые указывали бы на структурные изменения в исследуемых смесях.

В водных растворах аминокислот, так же как, например, в растворах N-метилпирролидона (N-МП), при повышении концентрации органического компонента абсолютная величина специфической составляющей существенно уменьшается вследствие разрушения сетки Н-связей воды (рис. 3, а). Неспецифические составляющие в изучаемых смесях (см. рис. 3, б) пред-

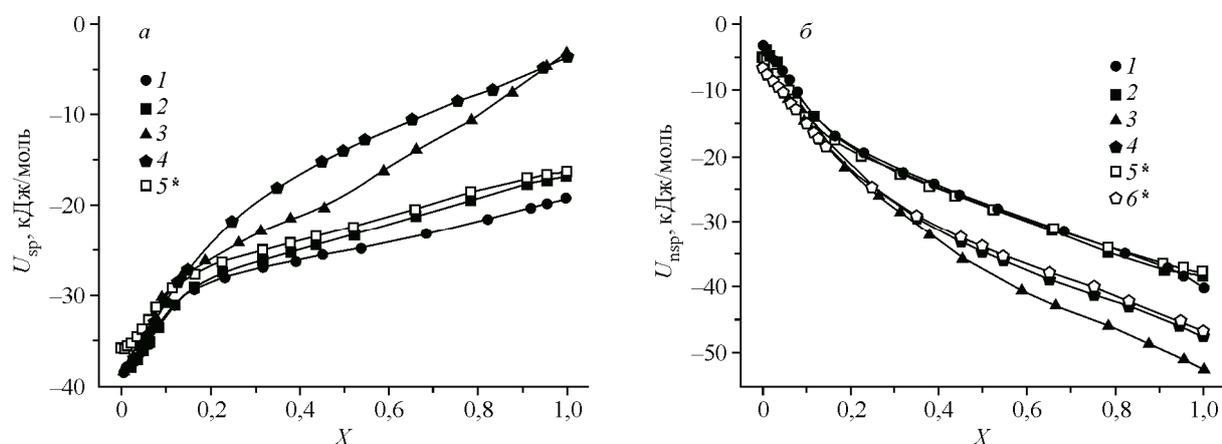


Рис. 3. Вклады  $U_{\text{sp}}$  (а) и  $U_{\text{nsp}}$  (б) в полную энергию межмолекулярных взаимодействий в водных растворах аминокислот и N-МП при 298,15 К: МЭА (1), ДМЭА (2, 5) (5 — 313,15 К), ДЭА (3), N-МП (4, 6) (6 — 328,15 К)

ставляют функции, которые вогнуты вниз. С добавлением к воде аминокспиртов, так же как в системах вода—апротонный амид, неспецифические взаимодействия в растворах усиливаются в противоположность специфическим взаимодействиям, которые ослабевают. При повышении температуры значения  $|U_{sp}|$  уменьшаются во всем диапазоне составов (см. рис. 3, а), а вклад  $|U_{nsp}|$  в области с высоким содержанием воды, наоборот, усиливается, как это показано для водных растворов диметилэтанолamina и N-МП соответственно, в области  $X \leq 0,2$  и  $X \leq 0,3$  (см. рис. 3, б). Это указывает на сохранение сетки Н-связей воды в этой области составов, вследствие ослабления связанности которой с повышением температуры наблюдается усиление неспецифических взаимодействий. По данным компьютерного моделирования водных растворов апротонных амидов, сетка Н-связей воды в таких системах разрушается при  $X \sim 0,3$  [22]. При дальнейшем понижении содержания воды в смесях наблюдается ослабление неспецифической составляющей  $|U_{nsp}|$  с увеличением температуры, что характерно для индивидуальных апротонных неэлектролитов.

В работах [26, 27] показано, что при наличии данных по внутреннему давлению соответствующие количественные вклады в  $H^E$ , обусловленные неспецифическими взаимодействиями, могут быть рассчитаны из соотношения

$$H_{nsp}^E = U_{nsp} - (1 - X)U - XU_{nsp}^2 \quad (8)$$

после вычисления неспецифических составляющих межмолекулярного взаимодействия в смесях и индивидуальных компонентах по уравнению (4). Вклады специфических взаимодействий в энтальпии смешения могут быть вычислены при наличии экспериментальных данных по энтальпиям смешения или расчетных величин специфических составляющих в смесях и индивидуальных растворителях из соотношения

$$H_{sp}^E = H^E - H_{nsp}^E = U_{sp} - (1 - X)U_{sp}^1 - XU_{sp}^2. \quad (9)$$

Нами из данных по  $U_{nsp}(X)$  и  $U_{sp}(X)$  определены соответствующие количественные вклады в  $H^E$ , обусловленные неспецифическими взаимодействиями в трех исследуемых системах (рис. 4, а). Причиной отрицательных величин (экзотермичности) энтальпий смешения воды со всеми из рассмотренных аминокспиртов, так же как, например, в системе вода—ДМФА (см. рис. 4, б), являются неспецифические взаимодействия, вопреки гидрофильному характеру аминокспиртов, обладающих полярными группами. Это указывает на то, что экзотермический

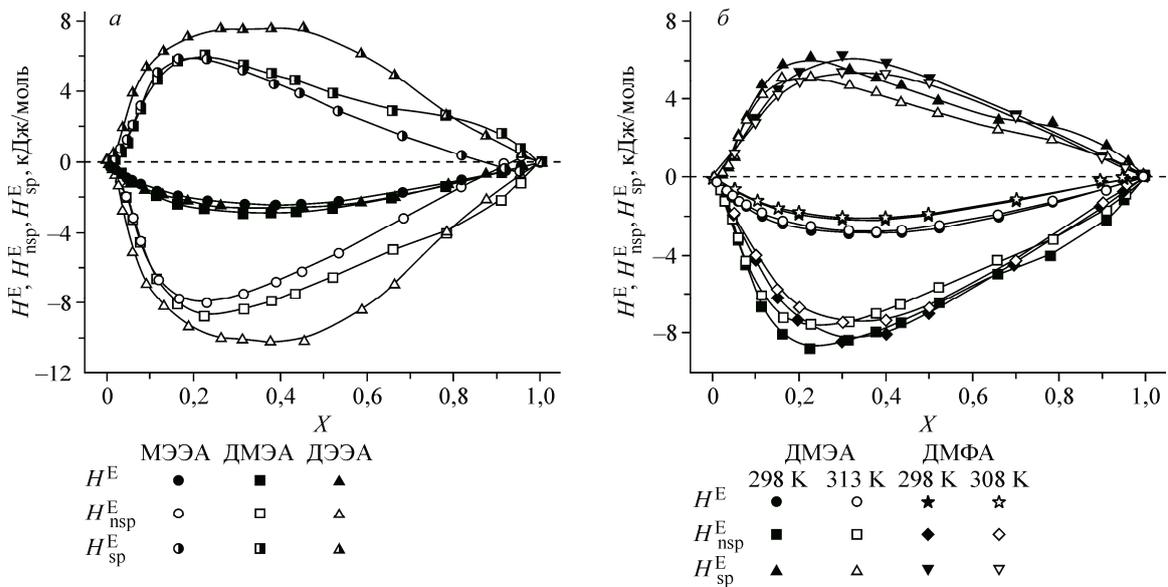


Рис. 4. Вклады  $H_{sp}^E$  и  $H_{nsp}^E$  в энтальпии смешения воды с аминокспиртами при 298,15 К (а) и с ДМЭА и ДМФА при разных температурах (б)

эффект от образующихся за счет Н-связей гетероассоциатов аминокспиртов с водой не компенсирует эндозффект от разрушения ее сетки водородных связей. На рис. 4, *a* видно, что с ростом мольного объема аминокспиртов от моноэтилэтаноламина к диэтилэтаноламину в том же направлении усиливается экзотермичность вкладов  $H_{\text{nsp}}^E$ , чему способствует увеличение площади поверхности алкильных групп, которая доступна для взаимодействия с окружающими молекулами воды. С другой стороны, вследствие увеличения диспергирующей способности аминокспиртов с ростом их мольного объема наблюдается последовательное увеличение вкладов  $H_{\text{sp}}^E$ . Однако в результате компенсации вкладов  $H_{\text{nsp}}^E$  и  $H_{\text{sp}}^E$  энтальпии смешения в этих смесях мало отличаются друг от друга. Увеличение температуры практически не отражается на виде функций  $H_{\text{sp}}^E(X)$  и  $H_{\text{nsp}}^E(X)$  в водных растворах аминокспиртов, которые, так же как и величины  $H^E$  в системе вода—ДМФА (см. рис. 4, *b*), уменьшаются по абсолютной величине. Поскольку во всех исследуемых смесях отрицательные величины энтальпий смешения обусловлены неспецифическими взаимодействиями, то представляется важным провести сравнение данных по вкладам  $H_{\text{nsp}}^E$  в смесях, представленных выше, с избыточными коэффициентами упаковки ( $y^E$ ), предложенными в работе [28] в качестве характеристики структурных изменений в растворах, не связанных с образованием гетерокомпонентных ассоциатов за счет водородной связи.

В соответствии с определением, коэффициент упаковки  $y$  рассчитывается из соотношения физического объема одного моля молекул растворителя ( $V_0$ ) к его мольному объему ( $V_m$ ):

$$y = V_0/V_m = \pi N_A \sigma^3 / (6V_m). \quad (10)$$

Здесь  $\sigma$  – диаметр молекулы растворителя;  $N_A$  — число Авогадро. Известно несколько методов расчета коэффициента  $y$ . Например, для апротонных диполярных растворителей он рассчитывался в рамках теории масштабных частиц из данных по коэффициентам изотермической сжимаемости. Идеальный коэффициент упаковки в бинарной системе в работе [28] предложено рассчитывать из объемных долей ( $\varphi$ ) и коэффициентов упаковки компонентов смесей:

$$y^{\text{id}} = \varphi_1 y_1 + \varphi_2 y_2, \quad (11)$$

а отклонение коэффициента  $y$  от вычисленного из аддитивной зависимости можно рассчитать из данных по избыточным объемным свойствам смесей:

$$y^E = y - y^{\text{id}} = -y^{\text{id}} V_m^E / V_m. \quad (12)$$

Как видно из этого соотношения, полученного в работе [28], объемные свойства смесей определяются геометрическим упаковочным эффектом.

На рис. 5, *a* представлены избыточные коэффициенты упаковки в водных растворах исследуемых аминокспиртов. Эти данные указывают на то, что максимально плотная упаковка рас-

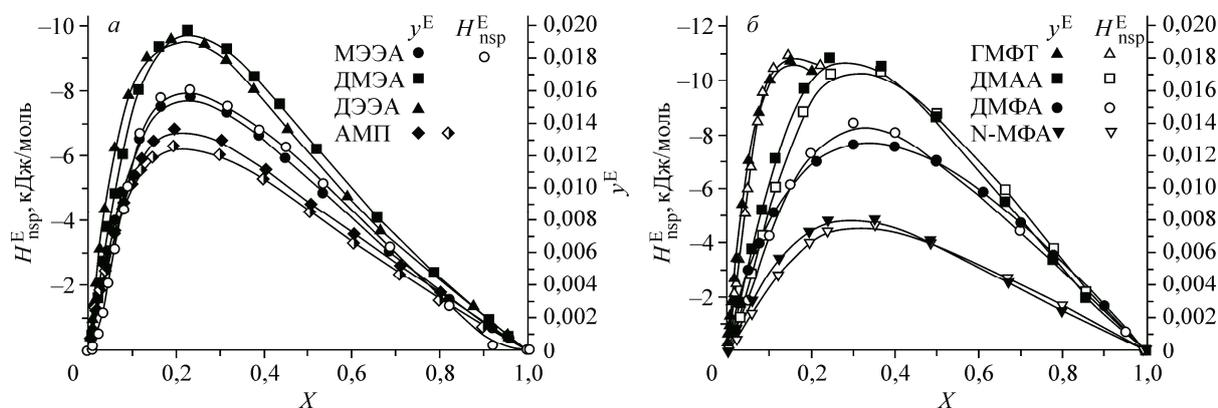


Рис. 5. Зависимость от состава вкладов  $H_{\text{nsp}}^E$  в энтальпии смешения (светлые символы) и избыточных коэффициентов упаковки  $y^E$  (темные символы) в системах вода—аминосспирт (*a*) и вода—амид при 298,15 К (*b*) (вода—АМП при 298,15 и 323,15 К)

творов находится в диапазоне составов  $X \sim 0,2$ . С уменьшением степени замещения протонов аминогруппы алкильными радикалами и возрастанием вклада  $U_{sp}$  в полную энергию межмолекулярного взаимодействия упаковка растворов становится менее плотной (см. рис. 5, б), что ранее было установлено для водных растворов амидов с разной степенью N-замещения [29]. Как показано на примере водных растворов АМП, упаковка водных растворов ухудшается с ростом температуры. Из рис. 5 видно, что координаты минимумов  $H_{nsp}^E$  в смесях воды с аминокспиртами и амидами находятся в области растворов с их максимальной упаковкой; на то же указывают изменения энтропии растворов в процессе изотермического расширения (см. рис. 1).

Корреляция этих параметров во всей области составов (см. рис. 5) указывает на то, что упаковка является доминирующим фактором, который определяет величину вкладов  $H_{nsp}^E$ . Можно предполагать, что величины избыточных коэффициентов упаковки, так же как и абсолютные значения вкладов  $H_{nsp}^E$ , возрастают от чистой воды до концентрации неэлектролитов, при которой разрушается сетка Н-связей воды. Ее разрушение, например, в водных растворах диметилацетамида (ДМАА) при  $X \sim 0,3$  подтверждено дифракционными методами [30]. Одним из последствий разрушения сетки является увеличение компактности системы (рост  $y^E$ ), что определяется малыми размерами молекулы воды. Корреляция энтропийных и энтальпийных характеристик систем вода—аминоспирт с избыточными упаковочными коэффициентами свидетельствует о том, что универсальные взаимодействия определяют структурные и энергетические свойства водных растворов исследуемых аминокспиртов.

Как показано в работе [31], в водных растворах неэлектролитов на переход от одной структурной области к другой указывают точки перегиба функций взаимодействия компонентов. Например, энтальпийная функция взаимодействия неводного компонента имеет вид

$$H_{A-A}^E = (1 - X_A) \partial H_A^E / \partial X_A. \quad (13)$$

Здесь  $H_A^E$  – избыточная парциальная мольная энтальпия второго компонента (аминоспирта). Энтальпийные функции взаимодействия аминокспирт—аминоспирт  $H_{A-A}^E$  и вода—вода  $H_{W-W}^E$  рассчитывались после вычисления соответствующих парциальных избыточных энтальпий  $H_W^E$  и  $H_A^E$

$$H_W^E = H^E - X_A (\partial H^E / \partial X_A)_{T,P}, \quad (14)$$

$$H_A^E = H^E + (1 - X_A) (\partial H^E / \partial X_A)_{T,P}. \quad (15)$$

При этом отрицательные значения  $H_{A-A}^E$  ( $H_{W-W}^E$ ) показывают, что взаимодействие А—А (W—W) является притягивательным, а положительные величины указывают на то, что взаимодействие молекул компонента является отталкивательным в энтальпийных терминах.

На рис. 6 представлены энтальпийные функции взаимодействия вода—вода  $H_{W-W}^E$  (см. рис. 6, а) и аминокспирт—аминоспирт  $H_{A-A}^E$  (см. рис. 6, б) при 298,15 К. Точки перегиба на соответствующих зависимостях (приведены для системы вода—ДЭЭА) разделяют весь концентрационный диапазон на несколько областей. Согласно подходу [31], в этих системах можно выделить три концентрационные области (I, II, III) и переходный участок  $Z < X < Y$ , в границах которого начинается разрушение структуры воды  $H_{W-W}^E > 0$ . Дальнейшее ее разрушение происходит во II структурной области, где также  $H_{W-W}^E > 0$ . На рис. 6, б видно, что имеется достаточно широкая область III, в которой доминирует структура индивидуальных аминокспиртов. Область растворов, в которой доминирует структура воды ( $0 < X < Z$ ), занимает существенно меньший концентрационный интервал. Обращает на себя внимание появление участков (см. рис. 6, а), где величины  $H_{W-W}^E \leq 0$ , что ранее было обнаружено для водных растворов апротонных амидов [32], указывающее на самоассоциацию воды. Подтверждение ее самоассоциации в этой области растворов, например в системе вода—ДМФА, было получено нами путем расчета уточненных параметров предпочтительной сольватации  $\delta X'_{WW}$  и  $\delta X'_{WA}$ . В пред-

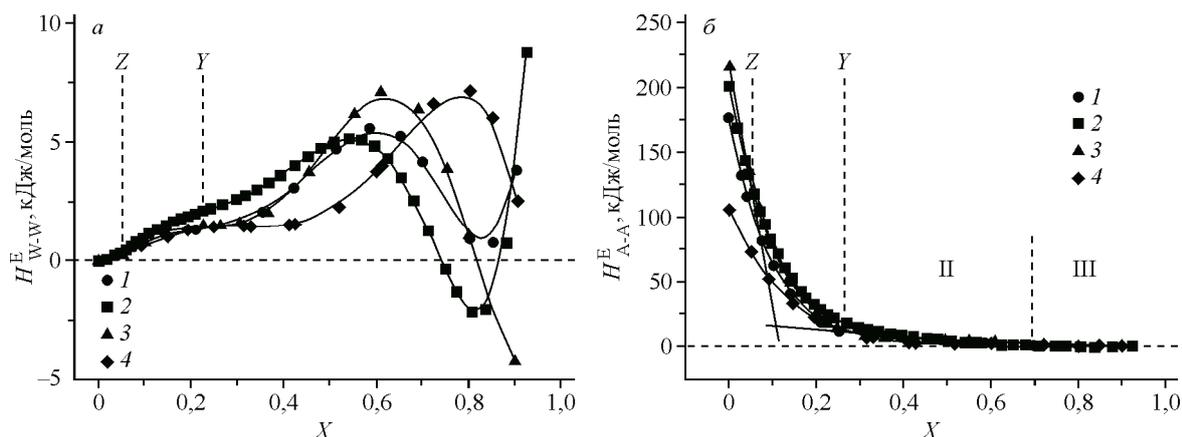


Рис. 6. Концентрационная зависимость энтальпийной функции взаимодействия  $H_{W-W}^E$  (а) и  $H_{A-A}^E$  (б) в водных растворах аминоспиртов при 298,15 К: МЭА (1), ДМЭА (2), ДЭА (3), АМП (4) при 308,15 К

ставленной работе эти параметры для системы вода—ДМЭА были вычислены так же, как в работе [32] с привлечением данных [33], и представлены на рис. 7 вместе с зависимостями, полученными для водных растворов ДМФА.

Параметры предпочтительной сольватации в системе вода—диметилэтаноламин дополняют набор термодинамических характеристик, представленных выше. Здесь видно, что в широкой области составов этой системы наблюдается разрушение структуры воды ( $\delta X'_{WW} < 0$ ). При этом вода преимущественно сольватирует диметилэтаноламин ( $\delta X'_{WA} > 0$ ). В области растворов с низким содержанием воды проявляется ее тенденция к самоассоциации ( $\delta X'_{WW} > 0$ ) при отсутствии предпочтительной сольватации ДМЭА ( $\delta X'_{WA} \sim 0$ ). Подобная же тенденция была обнаружена на функции  $H_{W-W}^E(X)$ . Вид зависимостей  $\delta X'_{WW}(X)$  и  $\delta X'_{WA}(X)$  симбатен соответствующим кривым для водных растворов ДМФА. Велика вероятность того, что при концентрации воды в растворе ( $X < 0,7$ ) гетероассоциаты  $H_2O \cdot 2DMЭА$  и  $H_2O \cdot DMЭА$  способны к ассоциации за счет молекул воды с образованием водных димеров и тримеров. Ранее подобный характер самоассоциации воды был установлен в водных растворах ДМФА [2, 34]. Сопоставление функций  $H_{W-W}^E(X)$  и  $\delta X'_{WW}$ , а также  $H_{A-A}^E(X)$  и  $\delta X'_{AA}$  ( $\delta X'_{AA} = -\delta X'_{WA}$ ) указывает на наличие корреляции (высокой степени антибатности) в водных растворах исследуемых аминоспиртов, что ранее было установлено для смесей воды с апротонными амидами [32].

Таким образом, в представленной работе рассчитаны термодинамические характеристики водных растворов аминоспиртов, полученных путем замещения протонов аминогруппы моноэтаноламина алкильными радикалами и не образующих сетки водородных связей. Это позволило выявить закономерности изменения структурных свойств исследуемых смесей. Структурно-термодинамические характеристики этих растворов оказались симбатны соответствующим зависимостям в водных растворах апротонных амидов. Корреляция энтропийных и энтальпийных характеристик систем вода—аминоспирт с избыточными упаковочными коэффициентами свидетельствует о том, что универсальные взаимодействия определяют структурные и энергетические свойства исследуемых водных растворов. Струк-

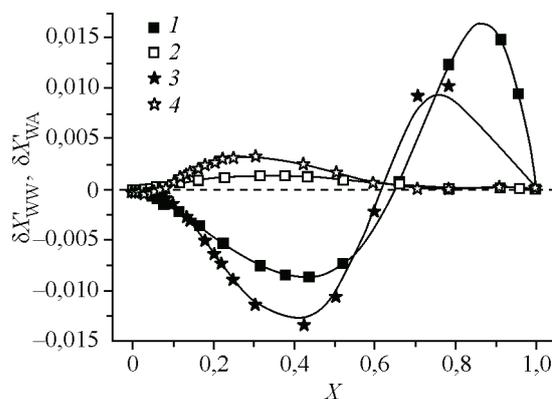


Рис. 7. Параметры предпочтительной сольватации  $\delta X'_{WW}$  (1, 3) и  $\delta X'_{WA}$  (2, 4) в первой сольватной оболочке компонентов системы вода—ДМЭА (1, 2) и вода—ДМФА (3, 4) при 298,15 К

турно-термодинамические параметры водных растворов МЭА и АМП оказались подобны соответствующим характеристикам смесей ДМЭА и ДЭАА с водой. В соответствии с результатами работы [35], это обусловлено тем, что наличие одной этильной группы у атома азота или двух метильных групп у соседнего атома углерода создает существенные стерические препятствия для образования межмолекулярных водородных связей молекулами МЭА и АМП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований — грант № 13-03-00251а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Frauenkron M., Melder J.-P., Ruider G. et al.* // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. – 2001. – **13**, N 1. – P. 405.
2. *Зайчиков А.М., Крестьянинов М.А.* // Журн. структур. химии. – 2008. – **49**, № 2. – С. 289.
3. *Зайчиков А.М.* // Журн. структур. химии. – 2006. – **47**, Приложение. – С. S77.
4. *Зайчиков А.М.* // Журн. общ. химии. – 2006. – **76**, № 4. – С. 660.
5. *Кундий О.С., Зайчиков А.М.* // Изв. вузов. Хим. хим. технол. – 2013. – **56**, № 6. – С. 24.
6. *Родникова М.Н.* Структурная самоорганизация в растворах и на границе раздела фаз. – М.: ЛКИ, 2008. – С. 151 – 186.
7. *Карцев В.Н., Родникова М.Н., Бартел Й. и др.* // Журн. физ. химии. – 2002. – **76**, № 6. – С. 1016.
8. *Dack M.R.J.* // Chem. Soc. Rev. – 1975. – **4**, N 1. – P. 211.
9. *Кесслер Ю.М., Зайцев А.Л.* Сольвофобные эффекты. – Л.: Химия, 1989.
10. *Maham Y., Teng T.T., Hepler L.G. et al.* // Thermochim. Acta. – 2002. – **386**, N 1. – P. 111.
11. *Lebrette L., Maham Y., Teng T.T. et al.* // Thermochim. Acta. – 2002. – **386**, N 1. – P. 119.
12. *Chan C., Maham Y., Mather A.E. et al.* // Fluid Phase Equil. – 2002. – **198**, N 1. – P. 239.
13. *Reis J.C.R., Santos A.F.S., Lampreia I.M.S.* // Chem. Phys. Chem. – 2010. – **11**, N 2. – P. 508.
14. *Reis J.C.R., Santos A.F.S., Dias F.A. et al.* // Chem. Phys. Chem. – 2008. – **9**, N 8. – P. 1178.
15. *Hawrylak B., Burke S.E., Palepu R.* // J. Solut. Chem. – 2000. – **29**, N 6. – P. 575.
16. *Alvarez E.A., Cerdeira F., Gomez-Diaz D. et al.* // J. Chem. Eng. Data. – 2010. – **55**, N 7. – P. 2567.
17. *Mundhwa M., Henni A.* // J. Chem. Eng. Data. – 2007. – **52**, N 2. – P. 491.
18. *Chiu L.-F., Li M.-H.* // J. Chem. Eng. Data. – 1999. – **44**, N 6. – P. 1396.
19. *Карцев В.Н., Родникова М.Н., Штыков С.Н.* // Журн. структур. химии. – 2004. – **45**, N 1. – С. 99.
20. *Зайчиков А.М.* // Журн. структур. химии. – 2012. – **53**, № 5. – С. 924.
21. *Зайчиков А.М., Макаров С.В.* // Журн. общ. химии. – 2012. – **82**, № 7. – С. 1071.
22. *Бушувев Ю.Г., Королев В.П.* Концентрированные и насыщенные растворы / Ред. А.М. Кутепов. – М.: Наука, 2003. – С. 255 – 313.
23. *Karpeina S., Slowik K., Verevkin S.P. et al.* // J. Chem. Eng. Data. – 2005. – **50**, N 2. – P. 398.
24. *Maham Y., Mather A.E., Hepler L.G.* // J. Chem. Eng. Data. – 1997. – **42**, N 5. – P. 988.
25. *Maham Y., Mather A.E., Hepler L.G.* // J. Chem. Eng. Data. – 1997. – **42**, N 5. – P. 993.
26. *Bagley E.B., Nelson T.P., Scigliano J.M.* // J. Phys. Chem. – 1973. – **77**, N 23. – P. 2794.
27. *Costas M., Bhattacharyya S.N., Patterson D.* // J. Chem. Soc., Faraday Trans. I. – 1985. – **81**, N 1. – P. 387.
28. *Balankina E.S., Lyashchenko A.K.* // J. Mol. Liq. – 2006. – **103-104**, N 1. – P. 211.
29. *Зайчиков А.М., Крестьянинов М.А.* // Журн. структур. химии. – 2013. – **54**, Приложение 2. – С. S341.
30. *Takamuku T., Matsuo D., Tabata M. et al.* // J. Phys. Chem. B. – 2003. – **107**, N 25. – P. 6070.
31. *Koga Y.* // J. Phys. Chem. – 1996. – **100**, N 13. – P. 5172.
32. *Зайчиков А.М., Крестьянинов М.А.* // Журн. структур. химии. – 2009. – **50**, № 4. – С. 676.
33. *Touhara H., Okazaki S., Okino F. et al.* // J. Chem. Thermod. – 1982. – **14**, N 1. – P. 145.
34. *Ohtaki H., Niwa Y., Ozutsumi K. et al.* // J. Mol. Liq. – 2006. – **129**, N 1. – P. 49.
35. *da Silva E.F., Svendsen H.F.* // Ind. Eng. Chem. Res. – 2003. – **42**, N 19. – P. 4414.