

УДК 541.123.3

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ ЖИДКОСТЬ – ПАР И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТВОРОВ БИНАРНЫХ СИСТЕМ *n*-ПРОПИЛБЕНЗОЛ – *n*-АЛКИЛБЕНЗОЛЫ

© 2024 г. Ю.К. Сунцов^а, Н.С. Сунцова^а

Воронежский государственный университет, 394018, Воронеж, Россия

*E-mail: jsyntsov@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2023

После доработки 29.09.2023

Принята к публикации 02.10.2023

Исследованы фазовые равновесия жидкость – пар растворов четырех бинарных систем, образованных *n*-пропилбензолом и *n*-алкилбензолами. Установлено, что вклады межмолекулярных взаимодействий в энергию Гельмгольца для растворов постоянных молярных концентраций, образованных *n*-пропилбензолом и *n*-алкилбензолами, дробно-линейно зависят от молярной массы *n*-алкилбензола в гомологическом ряду. Соответствующие уравнения получены.

Ключевые слова: фазовые равновесия жидкость – пар, энергии Гельмгольца и Гиббса, энтальпия, энтропия растворов, прогнозирование термодинамических свойств бинарных растворов.

DOI: 10.31857/S0044453724030044, EDN: QQN11M

ВВЕДЕНИЕ

Термодинамическая теория растворов на настоящей стадии ее развития не столько предсказывает, сколько интерпретирует с молекулярной точки зрения наблюдаемые на опыте зависимости для термодинамических функций смешения. Дальнейшее развитие термодинамики жидкого состояния требует явного учета молекулярных концепций [1, 2]. При производстве *n*-алкилбензолов часто встречаются растворы, образованные *n*-пропилбензолом и *n*-алкилбензолами. Алкилбензолы широко используются в химической технологии в качестве растворителей, экстрагентов и пластификаторов [3, 4]. Литературные данные о термодинамических свойствах этих растворов носят фрагментарный характер, так как исследования часто проводились в технологических целях [5, 6]. Отметим, что существующие методы расчета свойств многокомпонентных производственных растворов базируются на свойствах их бинарных составляющих [7]. Нами исследованы фазовые равновесия жидкость – пар и объемные свойства растворов бинарных систем, образованных

n-пропилбензолом (общий компонент бинарных растворов) и бензолом, толуолом, этилбензолом, *n*-бутилбензолом во всем диапазоне концентраций при различных температурах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные растворы готовились из реактивов марки «х.ч.», обезвоженных по методикам [8] и ректифицированных без доступа воздуха, на ректификационной лабораторной колонне ОВ-503/1. Контроль остаточной влаги в реактивах осуществлялся потенциометрическим титрованием с использованием реактива Фишера [9]. Содержание воды в очищенных реактивах не превышало 0.01%. Константы очищенных веществ совпадали (табл. 1) с литературными данными [10–12]. Температуры кипения растворов (*T*) измерялись платиновым термометром сопротивления с точностью ± 0.05 К при различных давлениях (*P*) с использованием эбулиметров Свентославского. Измерение давления в эбулиметре осуществлялось ртутным манометром с помощью катетометра с точностью ± 6.6 Н/м². Постоянство давления в системе

Таблица 1. Свойства очищенных веществ

Экспериментальные данные				Литературные данные		
Вещество	ρ_4^{20}	T , К	n_D^{20}	ρ_4^{20} ,	T , К	n_D^{20}
Бензол	0.8789	353.3	1.5008	0.8790	353.25	1.5011
Толуол	0.8671	383.8	1.4965	0.8669	383.77	1.4969 1.4961
Этилбензол	0.8672	409.4	1.4959	0.8671	409.3	1.4959
<i>n</i> -Пропилбензол	0.8620	432.3	1.4916	0.8619	432.4	1.4920
<i>n</i> -Бутилбензол	0.8613	456.4	1.4898	0.8609	456.4	1.4898

Обозначения: ρ_4^{25} – плотность. T – температура кипения при нормальном давлении, n_D – показатель преломления при $T = 298$ К.

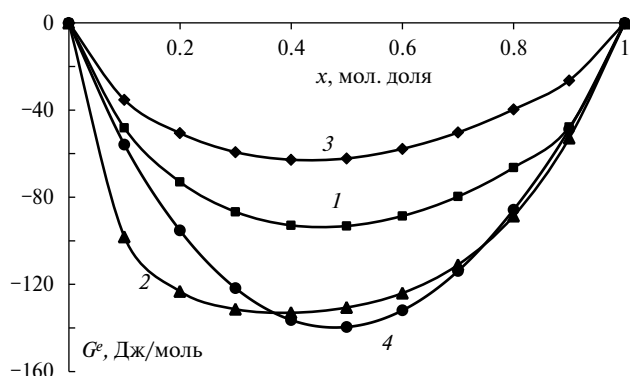


Рис. 1. Зависимости избыточной энергии Гиббса (G^E) от состава растворов систем при $T = 353$ К: 1 – *n*-пропилбензол – бензол; 2 – *n*-пропилбензол – толуол; 3 – *n*-пропилбензол – *n*-этилбензол; 4 – *n*-пропилбензол – *n*-бутилбензол; x – мольная доля *n*-пропилбензола.

поддерживалось изодромным регулятором с точностью ± 6.6 Н/м² [13]. Атмосферное давление измерялось с той же точностью ртутным барометром первого класса. Плотность растворов определяли пикнометрами Оствальда с точностью ± 0.1 кг/м³ [8].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе экспериментальных $P = f(T)$ данных построены изотермы давления $P = f(x)$ насыщенного пара растворов систем. Ранее установлено, что при пониженных давлениях паровая фаза растворов подчиняется законам идеального газа [7]. Составы паровых фаз растворов рассчитывали численным интегрированием уравнения Дюгема – Маргулеса методом Рунге – Кутты четвертого порядка, которое при $T = \text{const}$ и условии идеальности паровой фазы приобретает вид [13]:

$$dy = y(1 - y) dP / (y - x)P, \quad (1)$$

где: x , y – мольные доли высококипящего компонента в жидкости и паре, P – давление насыщенного пара бинарного раствора. На основе полученных P - X - Y - T данных (табл. 2) по известным термодинамическим соотношениям рассчитаны значения коэффициентов активности (γ_i), избыточные химические потенциалы компонентов (μ_i^E) и изобарные потенциалы растворов (G^E) систем [14].

Анализ полученных результатов свидетельствует, что растворы систем обладают отрицательными отклонениями от идеального состояния. Концентрация *n*-пропилбензола в паровой фазе систем увеличивается при возрастании молярной массы второго компонента раствора. При ректификации растворов систем *n*-пропилбензол – бензол, *n*-пропилбензол – толуол и *n*-пропилбензол – этилбензол концентрация *n*-пропилбензола в паровой фазе меньше, чем второго компонента раствора. Наоборот, в случае растворов *n*-пропилбензол – *n*-бутилбензол концентрация молекул *n*-пропилбензола в паровой фазе больше, чем у второго компонента раствора (табл. 2). Повышение температуры (давления) смещает равновесие жидкость – пар растворов систем, обогащая ее компонентами с большей мольной теплотой испарения, что согласуется с правилом Вревского [15]. Отметим, что возрастание молекулярной массы второго компонента растворов связано с альтернативой величины ($G^E < 0$) для растворов систем (рис. 1).

Рассчитанные по методу Льюиса – Рендала значения термодинамических функций растворов не удалось связать уравнением с молярной

Таблица 2. Фазовые равновесия жидкость – пар и термодинамические свойства растворов систем *n*-пропилбензол – *n*-алкилбензолы при различных *T*, К

Параметр	<i>n</i> -пропилбензол – бензол, <i>T</i> = 363 К										
<i>x</i>	1.0000	0.9000	0.8000	0.7000	0.6000	0.5000	0.4000	0.3000	0.2000	0.1000	0.0000
<i>y</i>	1.0000	0.4532	0.2639	0.1704	0.1148	0.0782	0.0525	0.0335	0.0191	0.0081	0.0000
<i>p</i>	11.42	22.45	34.13	46.05	58.20	70.58	83.21	96.05	109.14	122.46	135.66
<i>V</i>	149.7	144.4	139.2	133.9	128.7	123.5	118.2	113.0	107.7	102.5	97.2
<i>G^e</i>	0.00	-58.0	-80.5	-96.7	-107.6	-113.1	-112.5	-104.6	-87.4	-56.5	0.00
<i>A^r</i>	21.43	21.07	20.65	20.23	19.81	19.39	18.97	18.54	18.11	17.67	17.24
<i>n</i> -пропилбензол – бензол, <i>T</i> = 353 К											
<i>y</i>	1	0.4261	0.2438	0.1561	0.1048	0.0712	0.0477	0.0304	0.0174	0.0074	0
<i>p</i>	7.621	16.03	24.86	33.84	42.96	52.21	61.61	71.15	80.85	90.67	100.52
<i>V</i>	148.2	143.1	137.8	132.6	127.4	122.2	117.0	111.8	106.6	101.4	96.0
<i>G^e</i>	0.00	-47.8	-66.4	-79.7	-88.6	-93.2	-92.9	-86.7	-73.0	-48.2	0.00
<i>A^r</i>	20.15	19.55	18.92	18.28	17.65	17.02	16.40	15.76	15.13	14.50	13.86
<i>n</i> -пропилбензол – бензол, <i>T</i> = 343 К											
<i>y</i>	1.0000	0.3959	0.2220	0.1410	0.0943	0.0640	0.0429	0.0274	0.0157	0.0067	0.0000
<i>p</i>	4.977	11.24	17.77	24.40	31.13	37.96	44.88	51.90	59.02	66.25	73.54
<i>V</i>	146.6	141.5	136.3	131.1	125.9	120.7	115.5	110.3	105.1	99.9	94.7
<i>G^e</i>	0.00	-37.8	-49.5	-56.6	-59.0	-59.7	-57.5	-54.1	-47.1	-34.3	0.00
<i>A^r</i>	20.75	20.12	19.47	18.83	18.18	17.54	16.90	16.26	15.62	14.97	14.32
<i>n</i> -пропилбензол – толуол, <i>T</i> = 353 К											
<i>y</i>	1.000	0.6636	0.4515	0.3212	0.2318	0.1648	0.1131	0.0736	0.0435	0.0191	0.0000
<i>p</i>	7.621	10.24	13.16	16.24	19.37	22.52	25.66	28.84	32.14	35.68	39.69
<i>V</i>	148.2	144.7	141.3	137.8	134.4	131.0	127.5	124.1	120.6	117.2	113.7
<i>G^e</i>	0.00	-52.9	-88.6	-111.0	-124.0	-130.6	-133.0	-131.4	-123.2	-98.2	0.00
<i>A^r</i>	20.15	19.80	19.44	19.03	18.61	18.21	17.82	17.43	17.01	16.57	16.09
<i>n</i> -пропилбензол – толуол, <i>T</i> = 343 К											
<i>y</i>	1.0000	0.6354	0.4305	0.3029	0.2161	0.1534	0.1063	0.0697	0.0409	0.0179	0.0000
<i>p</i>	4.977	6.933	9.066	11.24	13.44	15.67	17.95	20.25	22.58	24.96	27.12
<i>V</i>	146.6	143.2	139.8	136.4	133.0	129.5	126.1	122.7	119.3	115.9	112.4
<i>G^e</i>	0.00	-61.3	-68.6	-69.4	-68.4	-66.3	-59.1	-52.9	-43.4	-29.6	0.00
<i>A^r</i>	20.75	20.12	19.47	18.83	18.18	17.54	16.90	16.26	15.62	14.97	14.32
<i>n</i> -пропилбензол – этилбензол, <i>T</i> = 353 К											
<i>y</i>	1.0000	0.8103	0.6532	0.5217	0.4102	0.3149	0.2327	0.1615	0.0997	0.0460	0.0000
<i>p</i>	7.621	8.426	9.292	10.159	11.039	11.932	12.852	13.772	14.719	15.665	16.661

Параметр	<i>n</i> -пропилбензол – этилбензол, $T = 353$ К										
V	148.2	146.4	144.6	142.9	141.1	139.4	137.6	135.8	134.1	132.3	130.9
G^e	0.00	-26.4	-39.7	-50.3	-57.8	-62.2	-62.8	-59.3	-50.6	-35.3	0.00
A^r	20.15	19.98	19.79	19.61	19.42	19.23	19.04	18.84	18.64	18.44	18.23
<i>n</i> -пропилбензол – этилбензол, $T = 343$ К											
y	1.0000	0.8045	0.6447	0.5123	0.4011	0.3068	0.2260	0.1564	0.0963	0.0443	0.0000
p	4.977	5.533	6.133	6.746	7.359	7.986	8.626	9.279	9.933	10.599	11.283
V	146.6	144.9	143.1	141.4	139.6	137.9	136.1	134.3	132.6	130.8	129.1
G^e	0.00	-27.0	-32.1	-33.2	-36.3	-35.9	-33.7	-29.8	-25.4	-17.3	0.00
A^r	20.75	20.57	20.38	20.19	20.00	19.80	19.60	19.40	19.20	18.99	18.78
<i>n</i> -пропилбензол – <i>n</i> -бутилбензол, $T = 363$ К											
y	1.0000	0.9593	0.9089	0.8490	0.7785	0.6958	0.5990	0.4852	0.3508	0.1910	0.0000
p	11.42	10.68	9.95	9.24	8.55	7.88	7.24	6.63	6.03	5.45	4.93
V	149.7	151.4	153.2	154.9	156.7	158.4	160.2	161.9	163.7	165.4	167.1
G^e	0.00	-48.0	-77.1	-93.9	-101.3	-100.9	-93.9	-80.9	-62.4	-38.8	0.00
A^r	19.56	19.82	20.07	20.31	20.53	20.76	20.97	21.18	21.38	21.58	21.76
<i>n</i> -пропилбензол – <i>n</i> -бутилбензол, $T = 353$ К											
y	1.0000	0.9612	0.9144	0.8581	0.7907	0.7100	0.6136	0.4984	0.3608	0.1964	0.0000
p	7.621	7.146	6.639	6.133	5.639	5.173	4.706	4.266	3.866	3.506	3.176
V	148.2	149.9	151.7	153.4	155.1	156.8	158.5	160.3	162.0	163.7	165.3
G^e	0.00	-48.8	-85.7	-113.8	-131.9	-139.5	-136.3	-121.7	-95.2	-55.8	0.00
A^r	20.15	20.41	20.68	20.93	21.18	21.40	21.63	21.85	22.04	22.22	22.40
<i>n</i> -пропилбензол – <i>n</i> -бутилбензол, $T = 343$ К											
y	1.0000	0.9646	0.9183	0.8614	0.7930	0.7114	0.6142	0.4986	0.3607	0.1953	0.0000
p	4.977	4.680	4.320	3.973	3.653	3.346	3.040	2.760	2.493	2.240	1.985
V	146.6	148.3	150.0	151.7	153.4	155.1	156.8	158.5	160.2	161.9	163.6
G^e	0.00	-26.68	-63.10	-83.93	-86.81	-83.74	-84.62	-72.62	-56.11	-34.26	0.00
A^r	20.75	21.01	21.28	21.54	21.77	22.00	22.23	22.44	22.64	22.84	23.06

Обозначения: x , y – мол. доли *n*-пропилбензола в жидкой и паровой фазе соответственно; p – давление насыщенного пара растворов (кПа); V – мольный объем растворов (см³/моль); G^e – избыточная энергия Гиббса растворов (Дж моль⁻¹); A^r – энергия Гельмгольца растворов (кДж моль⁻¹).

массой компонентов и составом систем. Для установления этой связи значения термодинамических функции растворов были рассчитаны с использованием «отсчетного состояния» – системы без межмолекулярного взаимодействия.

Это идеальный газ, взятый при температуре (T), объеме (V) и составе (X) реальной жидкости. Вклады межмолекулярного взаимодействия (ММВ) в изменение термодинамической функции определяются как разность значений

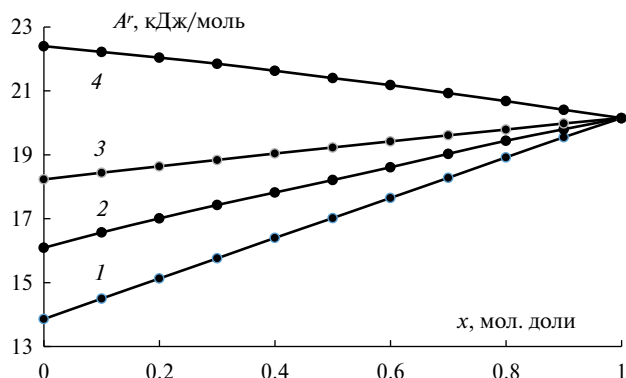


Рис. 2. Зависимости энергии Гельмгольца (A') от состава систем при $T = 353$ К: 1 – n -пропилбензол – бензол; 2 – n -пропилбензол – толуол; 3 – n -пропилбензол – n -этилбензол; 4 – n -пропилбензол – n -бутилбензол; x – мольная доля n -пропилбензола.

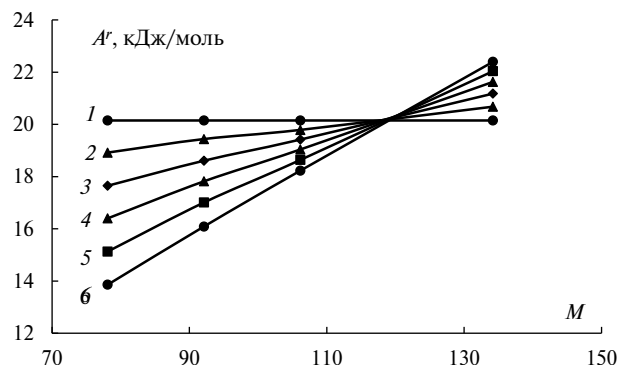


Рис. 3. Зависимости энергии Гельмгольца (A') от молярной массы n -алкилбензола для растворов постоянных мольных концентраций систем n -пропилбензол – n -алкилбензола при $T = 353$ К; $x = 1$ (1), 0.8 (2), 0.6 (3), 0.4 (4), 0.2 (5), 0 мол. долей n -пропилбензола (6).

этой функции для «отсчетного состояния» системы и реальной жидкой системы. Постоянство объема ($V = \text{const}$) исключает работу против любых сил, кроме сил межмолекулярного взаимодействия. Изотермический вариант ($T = \text{const}$) обуславливает изменение энтропии жидкости только за счет ММВ, но не температуры. В случае перехода моля раствора из состояния без ММВ молекул (подобное жидкости состояние со свойствами идеального газа) в состояние с ММВ (жидкость) для изменения энергии Гельмгольца (A') получили, например [1, 2, 16, 17]:

$$A' = RT \sum_i x_i \ln \frac{x_i RT}{\bar{p}_i V_x} - RT + P_x V_x, \quad (2)$$

где: x_i – мольная доля i -компонента в растворе; $\bar{p}_i$ – парциальное давление компонента раствора; P_x – давление насыщенного пара раствора; V_x – мольный объем раствора состава x_i ; R – газовая постоянная; T – температура, К.

Значения энергии Гельмгольца растворов систем (A') возрастают с увеличением молекулярной массы n -алкилбензола в гомологическом ряду (рис. 2). Возрастание значений (A') ММВ связано с затруднением условий перехода молекул компонентов в паровую фазу систем, что согласуется с уменьшением давления насыщенного пара растворов (табл. 2). Анализом полученных нами данных установлено, что для растворов постоянных мольных концентраций ($x_1 = \text{const}$) энергия Гельмгольца (A') дробно-ли-

нейно зависит от молярной массы (M) n -алкилбензола в гомологическом ряду: $A' = k_i M + b_i$ (рис. 3). Значения коэффициентов k_i и b_i изотерм $A' = k_i M + b_i$, в свою очередь, оказались линейно зависящими от состава растворов систем, что позволило предложить уравнение вида:

$$A' = (-0.1516x + 0.1526)M + 18.098x + 2.0176, \quad (3)$$

где: x – мол. доля n -пропилбензола (общий растворитель) в бинарных растворах; M – молярная масса n -алкилбензола. Уравнение (3) описывает энергию Гельмгольца (A') растворов систем при $T = 353$ К с точностью ± 0.05 кДж/моль. Вид уравнения (3) сохраняется при других температурах и для растворов других систем. Установленная закономерность подтверждает правомерность использования гипотезы об аддитивности вкладов химических групп в термодинамические свойства растворов, лежащей в основе теории «групповых» моделей растворов [7, 15]. Отметим, что ранее уравнения вида (3) были получены для растворов бинарных систем, образованных этанолом и n -алкилэтанатами, n -алкилпропаноатами, n -алкилбутаноатами; n -пропанолом и n -бутанолом с n -алкилэтанатами, а также для систем, образованных n -пропанолом, n -бутанолом, изопропанолом, изобутанолом и веществами гомологического ряда алифатических кетонов, бензолом и алкилбензолами [см., например, работы [16, 17–27]. Установленная закономерность изменения энергии Гельмгольца для растворов

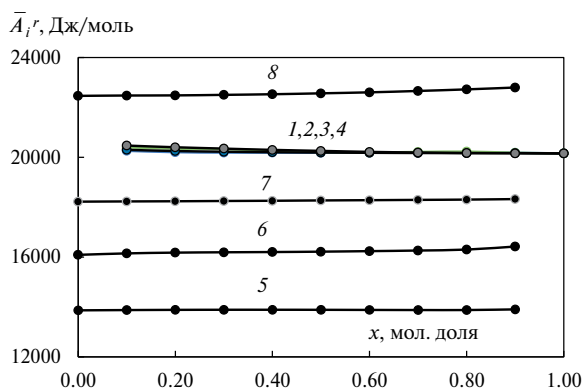


Рис. 4. Зависимости значений парциальной энергии Гельмгольца ($\bar{A}_i^r$) для *n*-пропилбензола (общий компонент растворов — 1–4) и вторых компонентов растворов систем (5–8) от состава систем: 1, 5 — *n*-пропилбензол — бензол; 2, 6 — *n*-пропилбензол — толуол; 3, 7 — *n*-пропилбензол — этилбензол; 4, 8 — *n*-пропилбензол — *n*-бутилбензол при $T = 353$ К: x — мол. доля *n*-пропилбензола.

постоянного мольного состава, вероятно, может быть вызвана «сходством молекулярно-статистической структуры растворов» [18]. Установленная закономерность позволяет прогнозировать термодинамические свойства растворов бинарных систем, используя свойства чистых компонентов и всего двух растворов одинаковой мольной концентрации. Точность прогнозирования свойств растворов зависит только от точности экспериментальных данных.

Для определения вклада молекул компонентов в ММВ в растворах по уравнению (4) рассчитаны значения парциальных значений энергии $\bar{A}_i^r$ [17,27]:

$$\bar{A}_i^r = \left(\frac{\partial A^r}{\partial n_i} \right)_{T,p,n_2} = RT \ln \frac{x_i RT}{p_i V} - RT \frac{\bar{V}_i}{V} + P \bar{V}_i, \quad (4)$$

где: $\bar{V}_i$, $\bar{p}_i$ — соответственно парциальные мольный объем и давление *i*-компонента в растворе состава x_i мольных долей; V , P — мольный объем и давление насыщенного пара раствора. Отметим, что при $x_i = 1$ уравнение (4) совпадает с уравнением для чистого компонента. Оказалось, что значения $\bar{A}_i^r$ *n*-пропилбензола в растворах систем меняются незначительно. Значения $\bar{A}_i^r$ для молекул *n*-алкилбензолов дискретно возрастают (на каждую группу — CH_2 -) с увеличением молекулярной массы, что связано с возрастанием роли молекул сложного

эфира в структурообразовании растворов систем (рис. 4). Эта закономерность подтверждает правомерность гипотезы, лежащей в основе статистических моделей растворов, известных как «групповые» [7]. Уравнение:

$$\begin{aligned} \bar{A}_i^e &= A_i^r - \bar{A}_i^r = \\ &= RT \ln \gamma_i - RT \left(\ln \frac{V_i^0}{V} - \frac{\bar{V}_i}{V} + 1 \right) + P_i^0 V_i^0 - P \bar{V}_i, \quad (5) \end{aligned}$$

где γ_i , V_i^0 , P_i^0 — коэффициент активности,

мольный объем и давление насыщенного пара *i*-компонента соответственно; V , $\bar{V}_i$ — мольных объем раствора и парциальный мольный объем *i*-го компонента в растворе состава x_i мольных долей, — полученное на основе избыточной парциальной энергии Гельмгольца ($\bar{A}_i^e$), позволяет при технологической необходимости рассчитывать значения коэффициента активности (γ_i) компонента в растворе [17, 27].

Между значениями $\bar{A}_i^e$ и $RT \ln \gamma_i$ (часто используемой для оценки ММВ в растворах) наблюдается существенное различие. Это различие вызвано изменением объемов растворов при смешении компонентов, которое учитывается тремя последними членами уравнения (5). Из табл. 2 мы видим, что роль объемных эффектов возрастает с увеличением размеров молекул компонентов раствора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Энергия Гельмгольца (A^r), для бинарных растворов одинаковых мольных концентраций, образованных *n*-пропилбензолом и веществами гомологического ряда *n*-алкилбензолов, дробно-линейно зависит от молярной массы *n*-алкилбензола (числа групп $-\text{CH}_2-$) в гомологическом ряду. Полученное на основе этой закономерности уравнение (3) позволяет прогнозировать термодинамические свойства растворов с точностью ± 50 Дж/моль.

2. Установленная закономерность подтверждает правомерность гипотезы, лежащей в основе «групповых» моделей растворов, об аддитивности вкладов функциональных групп в термодинамические свойства растворов.

3. Полагаем, что установленная закономерность (уравнение вида (3)) носит общий характер и позволяет с высокой точностью

прогнозировать термодинамические свойства бинарных растворов, используя свойства чистых компонентов и данные фазовых равновесий жидкость – пар двух растворов одинаковой молярной концентрации. Установленная закономерность ускоряет процесс исследования фазовых равновесий жидкость – пар и термодинамических свойств растворов бинарных систем примерно в 340 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудаков Е.С. Молекулярная, квантовая и эволюционная термодинамика. Донецк: Нац. акад. наук Украины. Ин-т физ.-орг. химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко, М-во образования Украины, 1998. 139 с.
2. *Suntsov Yu.* Legitimacies Change of Properties of Binary Systems on an Example of Solutions Formed by *n*-alcohols and Complex Ethers of Organic Acids // *Thermodynamics*. U.K., University of Cambridge. 2003. С. 99.
3. Лебедев Н.Н. Химия и технология основного и нефтехимического синтеза. 2-е изд. М.: Химия, 1975. 532 с.
4. Батуева И.Ю., Гайле А.А., Поконова Ю.В. и др. Химия нефти. Л.: Химия, 1984. 360 с.
5. Коган В.Б., Фридман В.М., Кафаров В.В. Равновесие между жидкостью и паром. Т. 1, 2. М.-Л.: Наука, 1966.
6. *DDBST* – Dortmund Data Bank Software & Separation Technology GmbH. 2020. www.ddbst.com
7. Морачевский А.Г. и др. Термодинамика равновесия жидкость – пар. Л.: Химия, 1989. 342 с.
8. *Becker H., Berger W. et al.* Organikum. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften. Berlin. 1976. 253 с.
9. Шарло Г. Методы аналитической химии. М.: Химия, 1965.
10. *National Institute of Standards and Technology (NIST)*. Search for Species Data by Chemical Formula. <http://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser.html>
11. *TCI American Organic Chemical 88/89 Catalog*. Portland: American Tokyo Kasei, 1988.
12. *Справочник химика* / Под ред. Б.К. Никольского. М.: Химия, 1971. Тт. 2, 4.
13. Перелыгин В.М., Сунцов Ю.К. // Изд. вузов СССР. Пищевая технология. 1974. № 2. С. 133.
14. Герасимов Я.И., Гейдериш Г.А. Термодинамика растворов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 184 с.
15. Пригожин И.Р. Молекулярная теория растворов. М.: Металлургия, 1990. 502 с.
16. Сунцов Ю.К., Сунцова Н.С. // Журн. физ. химии. 2021. Т. 95. № 6. С. 838. DOI:10.31857/S004445372106025X
17. *Suntsov Yu.K.* New Method of Predicting the Thermodynamic Properties of Solutions. 2014. V. 8 (3). P. 306–314. <https://doi.org/10.17265/1934-7375/2014.03.01318>
18. Скрышевский А. Структурный анализ жидкостей. М.: Высш. школа, 1971. 254 с.
19. Сунцов Ю.К., Семенов А.А. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2004. № 6 (3). С. 283.
19. *Suntsov Yu.K., Semenov A.A.* // *Kondens. Sredy Mezhfaz. Granitsy*. 2004. V. 6. P. 283.
20. Сунцов Ю.К. // Журн. физ. химии. 2008. Т. 82. № 4. С. 625.
20. *Suntsov Yu. K.* // *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2008. V. 82. P. 530.
21. *Suntsov Yu.K.* // *Vestn. VGU. Ser. Khim. Biol. Farm.* 2009. V. 42. № 1.
22. Сунцов Ю.К. // Вестн. Казанского технологического университета. Казань: КГТУ, 2010. Т. 2. С. 126.
23. Сунцов Ю.К., Власов М.В. // Вестн. Воронежского гос. университета. Сер.: Химия. Биология. Фармация. 2010. № 2. С. 41.
24. Сунцов Ю.К., Горюнов В.А. // Журн. физ. химии. 2012. Т. 86. № 7. С. 1173.
25. Сунцов Ю.К. // Журн. физ. химии. 2013. Т. 87. № 7. С. 1186.
26. Сунцов Ю.К. // Журн. физ. химии. 2016. Т. 90. № 8. С. 1209.
27. Сунцов Ю.К., Сунцова Н.С. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2021. Т. 23 (1). С. 81. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3307>