

## ТЕРМОДИНАМИКА ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ ЖИДКОСТЬ–ГАЗ В СИСТЕМЕ ДИИЗОПРОПИЛСУЛЬФОКСИД–ВОДА

Г.С. Григорян, А.Р. Саркисян

Геворг Сергеевич Григорян (ORCID 0000-0002-0675-735X)\*, Асмик Размиковна Саркисян (ORCID 0000-0002-0215-6012)

Ереванский государственный университет, кафедра физической и коллоидной химии, ул. Ал. Манукяна 1, Ереван, Армения, 0025

E-mail: gevsgrig@ysu.am\*, hassarg@ysu.am

*Измерено давление насыщенного пара водных растворов диизопропилсульфоксида различных концентраций при температурах 303,15 и 308,15 К. Показано, что общее давление насыщенного пара увеличивается с уменьшением концентрации диизопропилсульфоксида в растворе и с повышением температуры. Как и в случаях водных растворов диэтилсульфоксида и дипропилсульфоксида, наблюдается отрицательное отклонение от закона Рауля, что подтверждает ассоциирующие свойства диизопропилсульфоксида. На основании полученных результатов рассчитаны парциальные давления и коэффициенты активностей диизопропилсульфоксида и воды, а также избыточная энергия Гиббса их смешения. Показано, что избыточная энергия Гиббса смешения отрицательна и достигает своего минимального значения при мольной доле диизопропилсульфоксида равной 0,38. Полученные данные избыточной энергии Гиббса смешения диизопропилсульфоксида и воды обработаны с помощью уравнения Редлиха–Кистера. Также установлено, что взаимодействие между молекулами диизопропилсульфоксида и воды сильнее, чем в системе диэтилсульфоксид+вода, и слабее, чем в системе дипропилсульфоксид+вода. Этот факт можно объяснить усилением электронодонорной способности алкильной группы с увеличением длины углеводородной цепи, что увеличивает реакционную способность атома кислорода сульфоксидной группы. В итоге при переходе от диэтилсульфоксида к диизопропилсульфоксиду или дипропилсульфоксиду способность их молекул к взаимодействию с молекулами воды с образованием водородных связей увеличивается. Вместе с тем, уменьшение гидрофобных эффектов и дисперсионных сил между молекулами диизопропилсульфоксида с разветвленной углеводородной цепью приводит к ослаблению взаимодействия между молекулами в системе диизопропилсульфоксид+вода по сравнению с системой дипропилсульфоксид+вода, что также наблюдается экспериментально.*

**Ключевые слова:** диизопропилсульфоксид, водный раствор диалкилсульфоксида, давление насыщенного пара, избыточная энергия Гиббса

## THERMODYNAMICS OF LIQUID–GAS PHASE EQUILIBRIA OF DIISOPROPYLSULFOXIDE–WATER SYSTEM

G.S. Grigoryan, H.R. Sargsyan

Gevorg S. Grigoryan (ORCID 0000-0002-0675-735X) \*, Hasmik R. Sargsyan (ORCID 0000-0002-0215-6012)

Yerevan State University, Chair of Physical and Colloids Chemistry, A. Manukyan st., 1, Yerevan, 0025, Armenia

E-mail: gevsgrig@ysu.am\*, hassarg@ysu.am

*The saturated vapor pressure of diisopropylsulfoxide aqueous solutions was measured at temperatures of 303.15 K and 308.15 K. It was shown that the total saturated vapor pressure increases with decreasing diisopropylsulfoxide concentration in the solution and with increasing temperature. As in the cases of diethylsulfoxide and dipropylsulfoxide aqueous solutions, a negative*

*deviation from Raoult's law is also observed. This confirms the ability of diisopropylsulfoxide molecules to associate with water molecules. Based on the results obtained, the partial pressures, the activity coefficients of diisopropylsulfoxide and water and the excess Gibbs energy of their mixing, were calculated. It is shown that the excess Gibbs energy of mixing is negative and reaches its minimum value at a mole fraction of diisopropylsulfoxide equal to 0.38. The obtained data on the excess Gibbs energy of mixing DiPSO and water were treated using the Redlich–Kister equation. It has been established that the interaction between the molecules of diisopropylsulfoxide and water is stronger than in the diethylsulfoxide+water system, and weaker than in the dipropylsulfoxide+water system. This fact can be explained by an increase in the electron-donating ability of the alkyl group with increasing hydrocarbon chain length, which increases the reactivity of the oxygen atom of the sulfoxide group. As a result, when moving from diethylsulfoxide to diisopropylsulfoxide or dipropylsulfoxide, the ability of their molecules to interact with water molecules to form hydrogen bonds increases. At the same time, a decrease in hydrophobic effects and dispersion forces between diisopropylsulfoxide molecules with a branched hydrocarbon chain leads to a weakening of the interaction between molecules in the diisopropylsulfoxide+water system compared to the dipropylsulfoxide+water system, which is also observed experimentally.*

**Key words:** diisopropylsulfoxide, dialkylsulfoxide aqueous solution, saturated vapor pressure, excess Gibbs energy

**Для цитирования:**

Григорян Г.С., Саркисян А.Р. Термодинамика фазовых равновесий жидкость–газ в системе диизопропилсульфоксид–вода. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 1. С. 67–73. DOI: 10.6060/ivkkt.20246701.6933.

**For citation:**

Grigoryan G.S., Sargsyan H.R. Thermodynamics of liquid–gas phase equilibria of diisopropylsulfoxide–water system. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 1. P. 67–73. DOI: 10.6060/ivkkt.20246701.6933.

## ВВЕДЕНИЕ

Возросший интерес к диалкилсульфоксидам (ДАСО) и их водным растворам вызван с одной стороны их биомедицинской значимостью [1-2], а с другой стороны их уникальными физико-химическими свойствами [3-15]. В частности, в жидком состоянии и в водных растворах молекулы ДАСО сильно ассоциированы. Проведено много исследований по изучению термодинамики фазовых равновесий двухкомпонентных систем [16-22]. Однако одним из эффективных методов исследования ассоциации и сольватации в растворах является измерение давления насыщенного пара [19-22]. Ранее были исследованы давления насыщенного пара диметилсульфоксида (ДМСО), диэтилсульфоксида (ДЭСО), дипропилсульфоксида (ДПСО) и их водных растворов [20-22]. В работе [23] нами изучено давление насыщенного пара чистого диизопропилсульфоксида (ДиПСО) и рассчитаны термодинамические параметры фазового равновесия жидкость–газ этого сульфоксида.

В настоящей работе представлены результаты измерения давления насыщенного пара водных растворов ДиПСО различных концентраций при температурах 303,15 К и 308,15 К, рассчитаны

парциальные давления, коэффициенты активностей ДиПСО и воды, а также избыточная энергия Гиббса смешения ( $G^E$ ).

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Определение давления насыщенного пара водных растворов ДиПСО проводилось статическим методом на установке и по методике, детально описанной в работе [21]. Давление пара измерялось с помощью U-образного масляного манометра. Манометр наполовину был заполнен диффузионным маслом “ВМ-1” (ГОСТ 5671-70,  $d^{20} = 0,8703$  г/мл). Масло “ВМ-1” характеризуется низким давлением насыщенных паров (не выше  $4 \cdot 10^{-8}$  Па при комнатной температуре) и нерастворимостью в нем паров как ДАСО, так и воды. Погрешность измерения давления не превышала  $\pm 2,15$  Па.

В экспериментах использовался очищенный и перегнанный ДиПСО с массовой долей не менее 99,5%. Основной примесью является диизопропилсульфон, вклад которого в давление насыщенного пара, особенно водных растворов, ничтожен. ДиПСО и бидистиллированную воду смешивали под вакуумом. Температура водных растворов ДиПСО поддерживалась постоянной. Погрешность измерения температуры не превышала  $\pm 0,1$  К.

Статистическая обработка полученных экспериментальных данных, а также расчетных величин проведена с помощью компьютерной программы “Origin 8.5”.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общее давление насыщенного пара водных растворов ДиПСО различных концентраций измерено при температурах 303,15 К и 308,15 К. Результаты усредненных значений нескольких (не менее пяти) измерений при данной температуре приведены в табл. 1.

Таблица 1

Давление насыщенного пара водных растворов ДиПСО различных концентраций при 303,15 К и 308,15 К

Table 1. Saturated vapor pressure of DiPSO aqueous solutions of various concentrations at 303.15 K and 308.15 K

$x_{\text{ДиПСО}}$	$P_{\text{общ}}, \text{Па}$	
	$T = 303,15 \text{ К}$	$T = 308,15 \text{ К}$
0,0000	4240,2	5619,3
0,0672	3583,0	4839,2
0,1147	2983,1	4049,5
0,1562	2549,8	3730,0
0,2143	2166,5	3299,7
0,3203	1449,8	1916,5
0,4255	933,3	1416,5
0,5192	600,0	983,2
0,6183	366,7	649,9
0,7216	248,4	400,0
0,8383	107,0	173,5
1,0000	23,6	30,0

Данные табл. 1 показывают, что общее давление пара смеси растет с уменьшением мольной доли ДиПСО в растворе и с увеличением температуры. Графическая зависимость общего давления насыщенного пара от концентрации ДиПСО в растворе при температуре 303,15 К представлена на рис. 1. Для сравнения на рис. 1 приводятся также литературные данные давлений насыщенных паров водных растворов ДЭСО [21] и ДПСО [22] при той же температуре.

По характеру экспериментальной кривой, как и в случаях водных растворов ДЭСО и ДПСО, можно сделать вывод, что в водном растворе молекулы ДиПСО образуют сольваты с молекулами  $\text{H}_2\text{O}$ , причем в ряду ДЭСО–ДиПСО–ДПСО способность к взаимодействию с водой с образованием водородных связей увеличивается.

Для определения парциального давления ДиПСО в насыщенном паре было проведено интегрирование уравнения Гиббса-Дюгема (уравнение 1):

$$\ln P_{\text{ДиПСО}} = \ln P_{\text{ДиПСО}}^o - \int_{x_{\text{воды}}=0}^{x_{\text{воды}}} (x_{\text{воды}} / x_{\text{ДиПСО}}) d \ln P_{\text{воды}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ДиПСО}}$  – парциальное давление ДиПСО,  $P_{\text{ДиПСО}}^o$  – парциальное давление чистого ДиПСО,  $P_{\text{воды}}$  – парциальное давление воды,  $x_{\text{воды}}$  – мольная доля воды,  $x_{\text{ДиПСО}}$  – мольная доля ДиПСО в бинарном растворе. Расчет парциальных давлений компонентов проведен по методике, описанной в [20, 21]. Интегральная часть уравнения (1) определена графическим методом.

На основании полученных значений парциальных давлений ДиПСО и воды были рассчитаны коэффициенты активностей и избыточная энергия Гиббса смешения. Результаты расчетов, а также погрешности в определении указанных величин приведены в табл. 2.

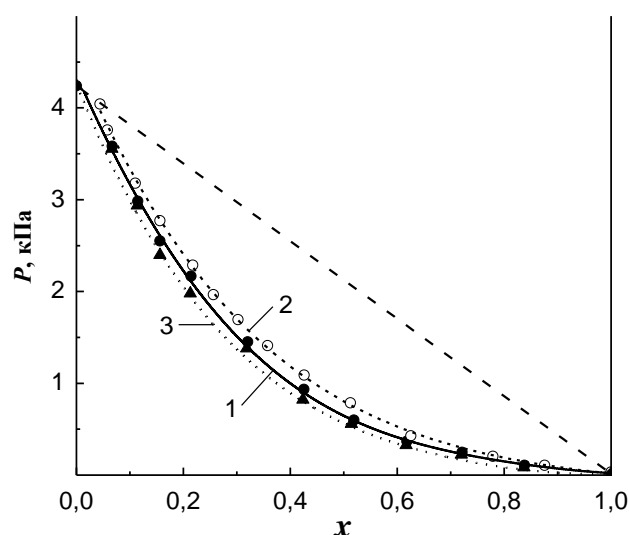


Рис. 1. Зависимость общего давления насыщенного пара бинарной системы от мольной доли ДАСО в растворе при 303,15 К: 1 – ДиПСО+ $\text{H}_2\text{O}$ , 2 – ДЭСО+ $\text{H}_2\text{O}$  [21], 3 – ДПСО+ $\text{H}_2\text{O}$  [22]

Fig. 1. Dependence of the total saturated vapor pressure of the binary system vs. the molar fraction of DASO in solution at 303.15 K: 1 – DiPSO+ $\text{H}_2\text{O}$ , 2 – DESO+ $\text{H}_2\text{O}$  [21], 3 – DPSO+ $\text{H}_2\text{O}$  [22]

Графическая зависимость избыточной энергии Гиббса смешения ДиПСО и  $\text{H}_2\text{O}$  от мольной доли ДиПСО в растворе при температуре 303,15 К представлена на рис. 2. Для сравнения на рис. 2 приводятся также значения избыточной энергии Гиббса смешения ДЭСО [21] и ДПСО [22] с водой при той же температуре.

Таблица 2

Парциальные давления, коэффициенты активностей и избыточная энергия смешения ДиПСО и воды при 303,15 и 308,15 К

Table 2. Partial pressures, activity coefficients and excess Gibbs energy of mixing of DiPSO and water at 303.15 and 308.15 K

$x_{\text{ДиПСО}}$	$P_{\text{общ}}, \text{Па}$	$P_{\text{ДиПСО}}, \text{Па}$	$P_{\text{воды}}, \text{Па}$	$\gamma_{\text{ДиПСО}}$	$\gamma_{\text{воды}}$	$G^E, \text{Дж/моль}$
<b><math>T = 303,15 \text{ К}</math></b>						
0,0000	4240,2	0,000	4240,200	-	1,000	0
0,0672	3583,0	0,016	3582,984	0,010	0,906	-1011
0,1147	2983,1	0,116	2982,984	0,043	0,795	-1422
0,1562	2549,8	0,327	2549,473	0,089	0,713	-1674
0,2143	2166,5	0,688	2165,812	0,136	0,650	-1931
0,3203	1449,8	2,218	1447,582	0,293	0,502	-2170
0,4255	933,3	4,810	928,490	0,479	0,381	-2186
0,5192	600,0	8,043	591,957	0,656	0,290	-2049
0,6183	366,7	11,943	354,757	0,818	0,219	-1772
0,7216	248,4	14,743	233,657	0,866	0,198	-1399
0,8383	107,0	19,552	87,448	0,988	0,128	-864
1,0000	23,6	23,600	0,000	1,000	-	0
<b><math>T = 308,15 \text{ К}</math></b>						
0,0000	5619,3	0,000	5619,300	-	1,000	0
0,0672	4832,9	0,041	4832,859	0,020	0,922	-863
0,1147	4049,5	0,280	4049,220	0,081	0,814	-1204
0,1562	3730,0	0,481	3729,519	0,103	0,787	-1430
0,2143	3299,7	0,841	3298,859	0,131	0,747	-1703
0,3203	1916,5	4,088	1912,412	0,425	0,501	-1906
0,4255	1416,5	6,958	1409,542	0,545	0,437	-1881
0,5192	983,2	10,627	972,573	0,682	0,360	-1767
0,6183	649,9	14,774	635,126	0,796	0,296	-1551
0,7216	400,0	19,100	380,900	0,882	0,243	-1239
0,8383	173,5	25,043	148,457	0,996	0,163	-760
1,0000	30,0	30,000	0,000	1,000	-	0

Примечание: погрешности:  $U(P)=2,15 \text{ Па}$ ,  $U(T)=0,1 \text{ К}$ ,  $U(\gamma)=0,0009$ ,  $U(G^E)=6,6 \text{ Дж/моль}$  (доверительная вероятность равна 0,95)  
 Note:  $U(P)=2.15 \text{ Pa}$ ,  $U(T)=0.1 \text{ K}$ ,  $U(\gamma)=0.0009$ ,  $U(G^E)=6.6 \text{ J/mol}$  (confidence probability is 0.95)

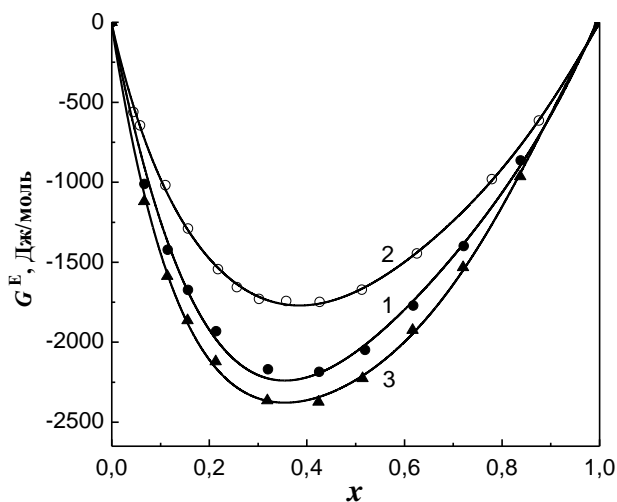


Рис. 2. Зависимость избыточной энергии Гиббса смешения от мольной доли ДАСО в растворе при 303,15 К:  
 1 – ДиПСО+Н<sub>2</sub>О, 2 – ДЭСО+Н<sub>2</sub>О [21], 3 – ДПСО+Н<sub>2</sub>О [22]  
 Fig. 2. Dependence of the excess Gibbs energy of mixing vs. the molar fraction of DASO in solution at 303.15 K:  
 1 – DiPSO+H<sub>2</sub>O, 2 – DESO+H<sub>2</sub>O [21], 3 – DPSO+H<sub>2</sub>O [22]

Как видно из рис. 2, избыточная энергия Гиббса смешения ДиПСО с водой отрицательна и достигает своего минимального значения при  $x_{\text{ДиПСО}} \approx 0,38$ .

Полученные данные избыточной энергии Гиббса смешения ДиПСО и воды были обработаны с помощью уравнения Редлиха–Кистера с параметрами  $B$ ,  $C$  и  $D$  (уравнение 2):

$$G^E = RTx_{\text{ДиПСО}}x_{\text{воды}}[B + C(2x_{\text{ДиПСО}} - 1) + D(2x_{\text{ДиПСО}} - 1)^2] \quad (2)$$

Определение значений корреляционных коэффициентов  $B$ ,  $C$  и  $D$  проведено с помощью компьютерной программы “Origin 8.5”. Стандартные отклонения ( $\sigma$ ) результатов расчетов и экспериментально определенных значений оценивались с помощью уравнения 3:

$$\sigma = \left[ \sum_{i=1}^n (G_{i,\text{эксп}}^E - G_{i,\text{расч}}^E)^2 / (m - n) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где  $m$  – число экспериментальных данных, а  $n$  – число параметров.

Значения параметров уравнения Редлиха-Кистера (корреляционные коэффициенты  $B$ ,  $C$  и  $D$ ) и стандартных отклонений ( $\sigma$ ) представлены в табл. 3.

**Таблица 3**  
**Параметры уравнения Редлиха-Кистера ( $B$ ,  $C$ ,  $D$ ) и стандартные отклонения ( $\sigma$ )**  
**Table 3. Redlich-Kister equation parameters ( $B$ ,  $C$ ,  $D$ ) and standard deviations ( $\sigma$ )**

$T$ , К	$B$	$C$	$D$	$\sigma$
303,15	-3,26243	1,74286	-1,29646	52,07
308,15	-2,79438	1,44794	-1,10233	36,68

Сравнивая полученные нами значения  $G^E$  с данными, полученными в работах [21, 22] для водных растворов ДЭСО и ДПСО, можно видеть, что избыточная энергии Гиббса смешения ДиПСО с водой по абсолютной величине всегда больше, чем в случае ДЭСО, и меньше, чем в случае ДПСО. Из этого следует, что взаимодействие между молекулами ДиПСО и воды сильнее, чем в системе ДЭСО+вода, и слабее, чем в системе ДПСО+вода. Это можно объяснить тем, что в гомологическом ряду ДАСО рост длины алкильной группы приводит к повышению их электронодонорных свойств, вследствие чего атом кислорода полярной суль-

фоксидной группы становится более реакционно-способным. В итоге при переходе от ДЭСО к ДиПСО или ДПСО способность их молекул к взаимодействию с молекулами воды с образованием водородных связей увеличивается. Вместе с тем, уменьшение гидрофобных эффектов и дисперсионных сил между молекулами ДиПСО с разветвленной углеводородной цепью приводит к ослаблению взаимодействия между молекулами в системе ДиПСО+вода по сравнению с системой ДПСО+вода [24], что также наблюдается экспериментально.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

*Работа выполнена в лаборатории физической химии Научно-исследовательского института химии ЕГУ при финансовой поддержке Комитета по Науке МОНКС РА.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The work was carried out in the Laboratory of Physical Chemistry of the YSU Chemistry Research Institute with the financial support of the Science Committee of the RA MESCS.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Grigoryan K., Zatikyan A., Shilajyan H.** Effect of Monovalent Ions on the Thermal Stability of Bovine Serum Albumin in Dimethylsulfoxide Aqueous Solutions. Spectroscopic approach. *J. Biomol. Struct. Dyn.* 2021. V. 39. N 6. P. 2284-2288. DOI: 10.1080/07391102.2020.1743759.
2. **Aznauryan M.G., Markarian S.A.** Properties of DNA + Dipropylsulfoxide or Dibutylsulfoxide + Water Ternary Solutions. *J. Solution Chem.* 2010. V. 39. P. 43-50. DOI: 10.1007/s10953-009-9481-5.
3. **Gabrielyan L.S.** FTIR and ab Initio Studies of Diisopropylsulfoxide and its Solutions. *J. Solution Chem.* 2017. V. 46. P. 759-776. DOI: 10.1007/s10953-017-0600-4.
4. **Wallace V.M., Dhumal N.R., Zehentbauer F.M., Kim H.J., Kiefer J.** Revisiting the Aqueous Solutions of Dimethyl Sulfoxide by Spectroscopy in the Mid- and Near-Infrared: Experiments and Car-Parrinello Simulations. *J. Phys. Chem. B.* 2015. V. 119. N 46. P. 14780-14789. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b09196.
5. **Ghazoyan H.H., Markarian S.A.** Densities and Thermochemical Properties of Dimethylsulfone in Dimethylsulfoxide and Dimethylsulfoxide/Water Equimolar Mixture. *J. Mol. Liq.* 2013. V. 183. P. 85-88. DOI: 10.1016/j.molliq.2013.04.010.
6. **Chaban V.V.** Force Field Development and Simulations of Senior Dialkylsulfoxides. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2016. V. 18. P. 10507-10515. DOI: 10.1039/C5CP08006A.

#### REFERENCES

1. **Grigoryan K., Zatikyan A., Shilajyan H.** Effect of Monovalent Ions on the Thermal Stability of Bovine Serum Albumin in Dimethylsulfoxide Aqueous Solutions. Spectroscopic approach. *J. Biomol. Struct. Dyn.* 2021. V. 39. N 6. P. 2284-2288. DOI: 10.1080/07391102.2020.1743759.
2. **Aznauryan M.G., Markarian S.A.** Properties of DNA + Dipropylsulfoxide or Dibutylsulfoxide + Water Ternary Solutions. *J. Solution Chem.* 2010. V. 39. P. 43-50. DOI: 10.1007/s10953-009-9481-5.
3. **Gabrielyan L.S.** FTIR and ab Initio Studies of Diisopropylsulfoxide and its Solutions. *J. Solution Chem.* 2017. V. 46. P. 759-776. DOI: 10.1007/s10953-017-0600-4.
4. **Wallace V.M., Dhumal N.R., Zehentbauer F.M., Kim H.J., Kiefer J.** Revisiting the Aqueous Solutions of Dimethyl Sulfoxide by Spectroscopy in the Mid- and Near-Infrared: Experiments and Car-Parrinello Simulations. *J. Phys. Chem. B.* 2015. V. 119. N 46. P. 14780-14789. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b09196.
5. **Ghazoyan H.H., Markarian S.A.** Densities and Thermochemical Properties of Dimethylsulfone in Dimethylsulfoxide and Dimethylsulfoxide/Water Equimolar Mixture. *J. Mol. Liq.* 2013. V. 183. P. 85-88. DOI: 10.1016/j.molliq.2013.04.010.
6. **Chaban V.V.** Force Field Development and Simulations of Senior Dialkylsulfoxides. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2016. V. 18. P. 10507-10515. DOI: 10.1039/C5CP08006A.

7. **Gabrielyan L.S., Markaryan Sh.A.** Dielectric Relaxation Spectroscopy Study of the Structure and Dynamics of Dialkyl Sulfoxide Solutions. *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2018. V. 92. N 2. P. 205-213. DOI: 10.1134/S0036024418020073.
8. **Senent M.L., Dalbouha S., Cuisset A., Sadovski D.** Theoretical Spectroscopic Characterization at Low Temperatures of Dimethyl Sulfoxide: The Role of Anharmonicity. *J. Phys. Chem. A*. 2015. V. 119. N 37. P. 9644-9652. DOI: 10.1021/acs.jpca.5b06941.
9. **Kirillov S.A., Gorobets M.I., Gafurov M.M., Ataev M.B., Rabadanov K.Sh.** Self-Association and Picosecond Dynamics in Liquid Dimethyl Sulfoxide. *J. Phys. Chem. B*. 2013. V. 117. P. 9439-9448. DOI: 10.1021/jp403858c.
10. **Казоян Е.А., Маркарян Ш.А.** Объемные свойства растворов диметилсульфона в смешанном растворителе (этанол-вода) в интервале температур 298,15-323,15 К. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2017. Т. 60. Вып. 7. С. 27-33. DOI: 10.6060/tcct.2017607.5564.
11. **Gabrielyan L.S., Markarian S.A., Weingärtner H.** Dielectric Relaxation of Dipropylsulfoxide. *J. Mol. Liq.* 2011. V. 159. P. 201-203. DOI: 10.1016/j.molliq.2011.01.007.
12. **Gabrielyan L.S., Markarian S.A.** Dielectric Relaxation Study of Dipropylsulfoxide/Water Mixtures. *J. Mol. Liq.* 2011. V. 162. P. 135-140. DOI: 10.1016/j.molliq.2011.06.016.
13. **Мхитарян А.С., Папанян З.Х., Габриелян Л.С., Маркарян Ш.А.** Кванто-химическое определение теплоты гидратации диэтилсульфона. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 8. С. 17-21. DOI: 10.6060/ivkkt201861008.5737.
14. **Markarian S.A., Gabrielyan L.S., Bonora S.** The Volumetric and Thermochemical Properties of Dipropylsulfoxide in Water. *J. Solution Chem.* 2010. V. 39. P. 591-602. DOI: 10.1007/s10953-010-9536-7.
15. **Celso F.L., Aoun B., Triolo A., Russina O.** Liquid Structure of Dibutylsulfoxide. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2016. V. 18. P. 15980-15987. DOI: 10.1039/C6CP02335E.
16. **Ghazoyan H.H., Grigoryan Z.L., Gabrielyan L.S., Markarian Sh.A.** Study of Thermodynamic Properties of Binary Mixtures of Propionitrile with Dimethylsulfoxide (or Diethylsulfoxide) at Temperatures from (298.15 to 323.15) K. *J. Mol. Liq.* 2019. V. 284. P. 147-156. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.03.147.
17. **Казакова А.И., Яковлев И.Г., Гаркушин И.К.** Фазовые равновесные состояния в двухкомпонентной системе дифенил-н-нонадекан. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 6. С. 46-53. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6733.
18. **Казоян Е.А.** Объемные свойства смеси акрилонитрил+этанол в интервале температур (293,15-323,15) К при внешнем давлении. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 2. С. 32-37. DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6068.
19. **Григорян З.Л., Казоян Е.А., Маркарян Ш.А.** Термодинамика фазовых равновесий жидкость-пар в системах диметилсульфоксид + алканол в интервале в интервале 293.15–323.15 К. *Журн. физ. химии*. 2015. Т. 89. № 10. С. 1588-1592.
7. **Gabrielyan L.S., Markaryan Sh.A.** Dielectric Relaxation Spectroscopy Study of the Structure and Dynamics of Dialkyl Sulfoxide Solutions. *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2018. V. 92. N 2. P. 205-213. DOI: 10.1134/S0036024418020073.
8. **Senent M.L., Dalbouha S., Cuisset A., Sadovski D.** Theoretical Spectroscopic Characterization at Low Temperatures of Dimethyl Sulfoxide: The Role of Anharmonicity. *J. Phys. Chem. A*. 2015. V. 119. N 37. P. 9644-9652. DOI: 10.1021/acs.jpca.5b06941.
9. **Kirillov S.A., Gorobets M.I., Gafurov M.M., Ataev M.B., Rabadanov K.Sh.** Self-Association and Picosecond Dynamics in Liquid Dimethyl Sulfoxide. *J. Phys. Chem. B*. 2013. V. 117. P. 9439-9448. DOI: 10.1021/jp403858c.
10. **Ghazoyan H.H., Markarian S.A.** Volumetric Properties of Solutions of Dimethylsulfone in Ethanol–Water Mixture at Temperatures Range of 298.15-323.15 K. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2017. V. 60. N 7. P. 27-33 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.2017607.5564.
11. **Gabrielyan L.S., Markarian S.A., Weingärtner H.** Dielectric Relaxation of Dipropylsulfoxide. *J. Mol. Liq.* 2011. V. 159. P. 201-203. DOI: 10.1016/j.molliq.2011.01.007.
12. **Gabrielyan L.S., Markarian S.A.** Dielectric Relaxation Study of Dipropylsulfoxide/Water Mixtures. *J. Mol. Liq.* 2011. V. 162. P. 135-140. DOI: 10.1016/j.molliq.2011.06.016.
13. **Mkhitaryan A.S., Papanyan Z.K., Gabrielyan L.S., Markarian Sh.A.** Heat of Hydration of Diethylsulfone by Quantum Chemical Calculation. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2018. V. 61. N 8. P. 17-21 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt201861008.5737.
14. **Markarian S.A., Gabrielyan L.S., Bonora S.** The Volumetric and Thermochemical Properties of Dipropylsulfoxide in Water. *J. Solution Chem.* 2010. V. 39. P. 591-602. DOI: 10.1007/s10953-010-9536-7.
15. **Celso F.L., Aoun B., Triolo A., Russina O.** Liquid Structure of Dibutylsulfoxide. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2016. V. 18. P. 15980-15987. DOI: 10.1039/C6CP02335E.
16. **Ghazoyan H.H., Grigoryan Z.L., Gabrielyan L.S., Markarian Sh.A.** Study of Thermodynamic Properties of Binary Mixtures of Propionitrile with Dimethylsulfoxide (or Diethylsulfoxide) at Temperatures from (298.15 to 323.15) K. *J. Mol. Liq.* 2019. V. 284. P. 147-156. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.03.147.
17. **Kazakova A.I., Yakovlev I.G., Garkushin I.K.** Phase Equilibrium States in a Two-Component Diphenyl-n-Nonadecane System. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 6. P. 46-53 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6733.
18. **Ghazoyan H.H.** Volumetric properties of acrylonitrile+ethanol mixture over temperature range from (293.15 to 323.15) K at ambient pressure. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 2. P. 32-37. DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6068.
19. **Grigoryan Z.L., Kazoyan E.A., Markaryan Sh.A.** Thermodynamics of Liquid–Gas Phase Equilibrium in Dimethyl Sulfoxide–Alkanol Systems in the Range of 293.15–323.5 K. *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2015. V. 89. N 10. P. 1790-1794. DOI: 10.1134/S0036024415100131.

20. **Qian X., Han B., Liu Y., Yan H., Liu R.** Vapor Pressure of Dimethyl Sulfoxide and Water Binary System. *J. Solution Chem.* 1995. V. 24. N 11. P. 1183-1188. DOI: 10.1007/bf00972964.
21. **Markarian S.A., Zatikyan A.L., Grigoryan V.V., Grigoryan G.S.** Vapor Pressures of Pure Diethyl Sulfoxide from (298.15 to 318.15) K and Vapor-Liquid Equilibria of Binary Mixtures of Diethyl Sulfoxide with Water. *J. Chem. Eng. Data.* 2005. V. 50. P. 23-25. DOI: 10.1021/je034278t.
22. **Григорян Г.С. Маркарян Ш.А.** Термодинамика фазовых равновесий жидкость-газ в системе дипропилсульфоксид-вода в интервале 303.15-323.15 К. *Журн. физ. химии.* 2013. Т. 87. Вып. 2. С. 211-214.
23. **Григорян Г.С. Маркарян Ш.А.** Термодинамика фазовых равновесий жидкость-газ диизопропил- и дибутилсульфоксидов. *Журн. физ. химии.* 2014. Т. 88. Вып. 6. С. 1074-1075.
24. **Pratt L.R.** Theory of Hydrophobic Effects. *Ann. Rev. Phys. Chem.* 1985. V. 36. N 1. P. 433-449. DOI: 10.1146/annurev.pc.36.100185.002245.
20. **Qian X., Han B., Liu Y., Yan H., Liu R.** Vapor Pressure of Dimethyl Sulfoxide and Water Binary System. *J. Solution Chem.* 1995. V. 24. N 11. P. 1183-1188. DOI: 10.1007/bf00972964.
21. **Markarian S.A., Zatikyan A.L., Grigoryan V.V., Grigoryan G.S.** Vapor Pressures of Pure Diethyl Sulfoxide from (298.15 to 318.15) K and Vapor-Liquid Equilibria of Binary Mixtures of Diethyl Sulfoxide with Water. *J. Chem. Eng. Data.* 2005. V. 50. P. 23-25. DOI: 10.1021/je034278t.
22. **Grigoryan G.S., Markaryan S.A.** Thermodynamics of Liquid-Gas Phase Equilibria in the Dipropylsulfoxide-Water System in the Range of 303.15 to 323.15 K. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2013. V. 87. N 2. P. 191-193. DOI: 10.1134/S0036024413020027.
23. **Grigoryan G.S., Markaryan S.A.** Thermodynamics of Liquid-Gas Phase Equilibria of Diisopropyl and Dibutyl Sulfoxides. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2014. V. 88. N 6. P. 1071-1072. DOI: 10.1134/S0036024414060132.
24. **Pratt L.R.** Theory of Hydrophobic Effects. *Ann. Rev. Phys. Chem.* 1985. V. 36. N 1. P. 433-449. DOI: 10.1146/annurev.pc.36.100185.002245.

Поступила в редакцию 04.07.2023  
Принята к опубликованию 28.09.2023

Received 04.07.2023  
Accepted 28.09.2023