

РАСТВОРИМОСТЬ ПИПЕРАЗИНА В РЯДЕ СПИРТОВ И ПРОСТЫХ ЭФИРОВ**Ю.В. Демидова, П.А. Демидов**

Кафедра технологии нефтехимических и углехимических производств, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Московский пр., 26, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 190013
E-mail: demidova@spbti.ru

Пиперазин является важным сырьем для производства фармацевтических препаратов, пестицидов, полимеров и других продуктов органического синтеза. Процессы растворения и кристаллизация пиперазина играют ключевую роль в технологических процессах, таких как синтез, разделение компонентов реакционной смеси, кристаллизация, экстракция и очистка. Однако данные о растворимости пиперазина в органических средах остаются ограниченными, что затрудняет разработку новых процессов и материалов. В данной работе исследована растворимость пиперазина в ряде спиртов (n-бутанол, 2-(n-бутокс)этанол, 2-метоксиэтанол, 2-(2-метокси)этоксиэтанол) и простых эфиров (диметиловые эфиры ди- и триэтиленгликоля) в интервале температур от 20 до 90 °C при атмосферном давлении. Для определения растворимости использовался равновесный метод. Экспериментальные данные коррелировали с модифицированным уравнением Апельблата, уравнением λh и уравнением Вант-Гоффа. Наилучшее согласование с экспериментальными данными для большинства из указанных органических сред было достигнуто с использованием уравнения λh . Результаты исследования показали, что растворимость пиперазина увеличивается с ростом температуры. Также с помощью уравнения Вант-Гоффа были рассчитаны стандартные термодинамические свойства растворения, включая энтальпию, энтропию и энергию Гиббса. Термодинамические расчеты подтвердили, что процесс растворения пиперазина является эндотермическим, а движущая сила процесса обусловлена увеличением энтропии. Полученные данные могут быть использованы для моделирования и оптимизации процессов в химической и фармацевтической промышленности, прогнозирования поведения пиперазина в многокомпонентных системах, а также для дальнейших исследований в области термодинамики растворов и разработки новых материалов на основе пиперазина.

Ключевые слова: растворимость, пиперазин, термодинамическое моделирование, энтальпия растворения, спирты, простые эфиры

PIPERAZINE SOLUBILITY IN A ALCOHOLS AND ETHERS SERIES**Yu.V. Demidova, P.A. Demidov**

Department of Petrol and Coal Processing, Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Moskovsky pr., 26, Saint-Petersburg, 190013, Russia
E-mail: demidova@spbti.ru

Piperazine is an important raw material to produce pharmaceuticals, pesticides, polymers and other products of organic synthesis. The piperazine dissolution and crystallization processes play a key role in technological processes such as synthesis, reaction mixture components separation, crystallization, extraction and purification. However, data on the piperazine solubility in organic media remain limited, which complicates the development of new processes and materials. In this work, the piperazine solubility in a number of alcohols (n-butanol, 2-(n-butoxy)ethanol, 2-methoxyethanol, 2-(2-methoxy)ethoxyethanol) and ethers (dimethyl ethers of di- and triethylene glycol) was investigated in the temperature range from 20 to 90 °C at atmospheric pressure. The equilibrium method was used to determine solubility. The experimental data correlated with the

modified Apelblatt equation, the λh equation, and the Van't Hoff equation. The best agreement with the experimental data for most of the above organic media was achieved using the λh equation. The study results showed that the piperazine solubility increases with increasing temperature. Also, the dissolution standard thermodynamic properties, including enthalpy, entropy, and Gibbs energy, were calculated using the Van't Hoff equation. Thermodynamic calculations confirmed that the piperazine dissolution process is endothermic, and the driving force of the process is due to an increase in entropy. The data obtained can be used to model and optimize processes in the chemical and pharmaceutical industries, predict the piperazine behavior in multicomponent systems, as well as for further research in the field of solution thermodynamics and the development of new materials based on piperazine.

Keywords: solubility, piperazine, thermodynamic modeling, enthalpy of solution, alcohol, ether

Для цитирования:

Демидова Ю.В., Демидов П.А. Растворимость пиперазина в ряде спиртов и простых эфиров. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 3. С. 48–54. DOI: 10.6060/rcj.2025693.4.

For citation:

Demidova Yu.V., Demidov P.A. Piperazine solubility in a alcohols and ethers series. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 3. P. 48–54. DOI: 10.6060/rcj.2025693.4.

ВВЕДЕНИЕ

Пиперазин применяется в качестве сырья при получении фармацевтических препаратов, пестицидов, полимеров и других продуктов органического синтеза [1-6]. Растворение и кристаллизация пиперазина является критическим этапом, который определяет оформление технологического процесса как стадий синтеза, так и разделения компонентов реакционной смеси, поэтому для разработки современных технологий получения продуктов на базе пиперазина важно определить его равновесную растворимость в различных средах. Изучение растворимости пиперазина позволяет оптимизировать технологические процессы, такие как кристаллизация, экстракция и очистка, а также прогнозировать его поведение в многокомпонентных системах.

Несмотря на значительный интерес к пиперазину и его производным, исследования по его растворимости в различных системах остаются ограниченными. Большинство работ сосредоточено на водных растворах, в то время как поведение пиперазина в органических средах изучено в малой степени [7, 8]. Недостаток информации создает трудности при разработке новых процессов и материалов, где требуется точное знание термодинамических и кинетических характеристик растворов. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью создания надежной базы данных по растворимости пиперазина в выбранных средах, которая может быть использована для моделирования и оптимизации процессов в химиче-

ской и фармацевтической промышленности. Результаты работы могут также послужить основой для дальнейших исследований в области термодинамики растворов и разработки новых материалов на основе пиперазина.

В настоящей работе была определена растворимость пиперазина в ряде спиртов (*n*-бутанол, 2-(*n*-бутоксид)этанол (бутилцеллозольв), 2-метоксидэтанол (метилцеллозольв), 2-(2-метоксид)этоксидэтанол (метилкарбитол)) и простых эфиров (диметилловые эфиры ди- и триэтиленгликоля – ди- и триглим, соответственно) в интервале температур от 20 до 90 °С при атмосферном давлении с использованием равновесного метода, часто применяющегося для исследования подобных систем [9-12]. Экспериментальные данные коррелировали с модифицированным уравнением Апелблата, уравнением λh и уравнением Вант-Гоффа. Термодинамические свойства в процессе растворения для системы, включая стандартные молярные энтальпии, стандартные молярные энтропии и стандартные молярные энергии Гиббса, также были рассчитаны с помощью методов анализа Ван-Гоффа и уравнения Гиббса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Пиперазин трижды перекристаллизовывали из *n*-бутанола; его чистота составила 99,5% мас., что было подтверждено методом газовой хроматографии. Все реагенты, включая *n*-бутанол, бутилцеллозольв, метилцеллозольв, метилкарбитол, диглим и триглим, были аналитической чистоты с массовой долей выше 99,5%.

Данные по растворимости пиперазина были измерены равновесным методом в стеклянной колбе с рубашкой. Поддержание температуры ($\pm 0,1$ °C) осуществлялось циркуляцией силиконового масла в рубашке колбы. Насыщенные растворы пиперазина получали следующим образом. В колбу загружали заданный объем растворителя, к нему добавляли избыток пиперазина, после чего полученную массу перемешивали с помощью магнитной мешалки при заданной температуре в течение 8 ч. По истечении указанного времени перемешивание прекращали и суспензию выдерживали в течение 2 ч для осаждения нерастворенных частиц перед отбором пробы. Отбирали 1 мл верхнего прозрачного раствора, смешивали с 20 мл дистиллированной воды и анализировали.

Растворимость в мольных долях растворенного вещества (x) в различных растворителях определяется следующим образом:

$$x = \frac{\frac{x_P}{M_P}}{\frac{x_P}{M_P} + \frac{x_S}{M_S}},$$

где x_P и x_S – массовые доли пиперазина и растворителя, а M_P и M_S – молекулярные массы пиперазина и растворителя, соответственно.

Состав смеси определяли методом газожидкостной хроматографии с использованием хроматографического комплекса «Хромос-1000» (колонка НР-5 (длина 30 м, диаметр 0,2 мм, толщина пленки 0,25 мкм), детектор – пламенно-ионизационный). Условия хроматографирования: расход газа-носителя (азот) – 200 мл/мин, температура испарителя и детектора – 270 °C. Анализ проводился программированием температуры в следующем режиме: изотерма 150 °C в течение 2 мин, нагрев со скоростью 10 °C до температуры 250 °C и изотерма в течение 10 мин [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные растворимости пиперазина в *n*-бутаноле, бутилцеллозольве, метилцеллозольве, метилкарбитоле, диглиме и триглиме в интервале температур от 20 до 90 °C приведены в табл. 1. Результаты показывают, что растворимость пиперазина увеличивается с ростом температуры. Растворимость пиперазина внутри групп простых эфиров (диглим и триглим) и спиртов (*n*-бутанол, бутилцеллозольв, метилцеллозольв, метилкарбитол) оказалась близка между собой, при этом в первых она значительно выше, что может быть обусловлено межмолекулярными взаимодействиями (взаимодействием водородных связей и другими факторами).

Таблица 1

Растворимость пиперазина в различных органических растворителях
Table 1. Piperazine solubility in various organic solvents

Т, К	χ	уравнение Вант-Гоффа		модифицированное уравнение Аппельблата		уравнение λh	
		χ^{calc}	RD, %	χ^{calc}	RD, %	χ^{calc}	RD, %
n-бутанол							
293,15	0,325	0,289	-12,3	0,330	1,7	0,325	-0,1
303,15	0,361	0,358	-0,7	0,360	-0,1	0,364	-0,7
313,15	0,414	0,423	2,1	0,402	-3,0	0,407	1,8
323,15	0,456	0,484	5,7	0,453	-0,6	0,456	0,0
333,15	0,508	0,541	6,1	0,513	1,0	0,512	-0,7
343,15	0,572	0,594	3,8	0,580	1,5	0,576	-0,7
353,15	0,649	0,645	-0,6	0,654	0,8	0,651	-0,3
363,15	0,743	0,693	-7,2	0,734	-1,2	0,739	0,5
бутилцеллозольв							
293,15	0,314	0,271	-15,7	0,320	2,0	0,313	0,4
303,15	0,347	0,339	-2,3	0,342	-1,5	0,347	0,0
313,15	0,384	0,403	4,7	0,378	-1,7	0,386	-0,6
323,15	0,428	0,462	7,5	0,426	-0,5	0,431	-0,8
333,15	0,484	0,519	6,7	0,485	0,3	0,484	0,0
343,15	0,547	0,571	4,2	0,555	1,4	0,546	0,1
353,15	0,625	0,621	-0,6	0,632	1,1	0,621	0,7
363,15	0,726	0,668	-8,7	0,717	-1,2	0,711	2,1
метилцеллозольв							
293,15	0,334	0,296	-12,7	0,342	2,3	0,335	-0,3
303,15	0,373	0,362	-2,9	0,365	-2,3	0,369	1,0

Продолжение таблицы

313,15	0,407	0,424	4,1	0,401	-1,5	0,408	-0,3
323,15	0,450	0,482	6,7	0,449	-0,3	0,453	-0,7
333,15	0,502	0,537	6,5	0,506	0,8	0,505	-0,6
343,15	0,566	0,588	3,8	0,573	1,2	0,566	0,0
353,15	0,643	0,637	-0,9	0,647	0,7	0,639	0,7
363,15	0,736	0,683	-7,8	0,728	-1,0	0,726	1,4
метилкарбитол							
293,15	0,325	0,289	-12,3	0,330	1,7	0,325	-0,1
303,15	0,361	0,358	-0,7	0,360	-0,1	0,364	-0,7
313,15	0,414	0,423	2,1	0,402	-3,0	0,407	1,8
323,15	0,456	0,484	5,7	0,453	-0,6	0,456	0,0
333,15	0,508	0,541	6,1	0,513	1,0	0,512	-0,7
343,15	0,572	0,594	3,8	0,580	1,5	0,576	-0,7
353,15	0,649	0,645	-0,6	0,654	0,8	0,651	-0,3
363,15	0,743	0,693	-7,2	0,7342	-1,2	0,739	0,5
диглим							
293,15	0,488	0,465	-4,9	0,491	0,5	0,486	0,4
303,15	0,525	0,522	-0,6	0,523	-0,3	0,523	0,3
313,15	0,567	0,575	1,4	0,562	-0,9	0,564	0,5
323,15	0,606	0,625	3,0	0,606	0,0	0,608	-0,3
333,15	0,651	0,672	3,1	0,655	0,6	0,656	-0,8
343,15	0,707	0,716	1,3	0,707	0,0	0,709	-0,3
353,15	0,761	0,758	-0,5	0,763	0,3	0,767	-0,8
363,15	0,825	0,797	-3,5	0,822	-0,3	0,832	-0,8
тригим							
293,15	0,428	0,398	-7,5	0,433	1,1	0,428	-0,1
303,15	0,469	0,462	-1,6	0,464	-1,2	0,466	0,5
313,15	0,507	0,521	2,8	0,503	-0,7	0,508	-0,3
323,15	0,552	0,577	4,4	0,551	-0,1	0,555	-0,5
333,15	0,604	0,630	4,1	0,606	0,4	0,606	-0,4
343,15	0,663	0,679	2,4	0,667	0,7	0,664	-0,1
353,15	0,732	0,726	-0,8	0,734	0,3	0,728	0,5
363,15	0,809	0,770	-5,0	0,805	-0,5	0,801	1,0

Таблица 2

Параметры уравнений для пиперазина в различных органических растворителях
 Table 2. Equations parameters for piperazine in various organic solvents

Раствори- тель	уравнение Вант-Гоффа			уравнение λh			Модифицированное уравнение Апельблата			
	A	B	$10^2 \square R$ SMD	λ	h	$10^2 \square$ RSM D	A	B	C	$10^2 \square R$ SMD
n-бутанол	2,377	-624,5	3,2	0,1410	2609	0,35	-97,91	4186	14,77	0,43
бутилцел- лозольв	2,329	-603,3	3,3	0,04608	2574	0,57	99,43	4278	14,99	0,61
метилцел- лозольв	2,302	-587,9	3,1	0,01423	2407	0,44	-92,53	3961	13,97	0,62
метилкар- битол	2,384	-614,0	2,8	0,1652	2192	0,36	-83,14	3489	12,60	0,70
диглим	2,185	-504,1	1,7	0,01197	1292	0,42	-50,42	2019	7,749	0,28
тригим	2,328	-564,6	2,3	0,06206	1576	0,35	-69,88	2898	10,64	0,37

Моделирование растворимости. Были при-
менены три термодинамические модели для корре-

ляции между температурой и значениями раство-
римости в выбранных чистых растворителях.

Уравнение Вант-Гоффа. Согласно термодинамическим принципам равновесия твердое тело-жидкость, уравнение Вант-Гоффа является универсальным уравнением, используемым для корреляции мольной доли растворенного вещества с температурой [14].

$$x = A + \frac{B}{T},$$

где параметры А и В могут быть получены путем регрессии растворимости с использованием многомерной неограниченной нелинейной минимизации. Целевая функция (OF) выражается как

$$OF = \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i^{calc} - x_i^{exp}}{x_i^{calc}} \right)^2,$$

где N – количество экспериментальных точек, верхний индекс «calc» обозначает рассчитанные значения, а «exp» – экспериментальные значения.

Расчетная растворимость и достигнутые относительное отклонение (RD) приведены в табл. 1. Значения А и В, а также среднеквадратичное отклонение (RMSD) представлены в табл. 2. RD и RMSD определены следующим образом:

$$RD = \frac{x_i^{calc} - x_i^{exp}}{x_i^{calc}}$$

$$RMSD = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^{calc} - x_i^{exp})^2 \right)^{0,5}.$$

Значения в табл. 2 показывают, что максимальное значение RMSD, рассчитанное с помощью модели Вант-Гоффа, составляет 0,033. В целом растворимость, определенная с помощью модели Вант-Гоффа, удовлетворительно согласуется с экспериментальным значением для исследуемых систем.

Модифицированное уравнение Апелъблата. Растворимость пиперазина с температурой коррелирует с модифицированным уравнением Апелъблата [15], которое представляет собой полуэмпирическое уравнение, основанное на равновесии твердой и жидкой фаз, и выражается следующим образом:

$$x = A + \frac{B}{T} + C \cdot \ln T,$$

где А, В и С – параметры модели.

Значение С отражает влияние температуры на энтальпию плавления [16]. Регрессионные значения параметров А, В и С и RMSD приведены в табл. 2; рассчитанная растворимость и значения RD представлены в табл. 1. Можно видеть, что значения параметра С относительно малы, что указывает на относительно малый вклад изменения теплоемкости на энтальпию плавления.

Максимальное среднеквадратичное значение составляет 0,070 для уравнения Апелъблата, что выше, чем значение для модифицированного уравнения λh.

Уравнение Буховски. Уравнение Буховски-Ксяжака [17] является модификацией уравнения λh, и выражается следующим образом

$$\ln \left(1 + \frac{\lambda \cdot (1-x)}{x} \right) = \lambda \cdot h \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_m} \right),$$

где $T_m = 385$ К – температура плавления пиперазина. Параметр λ можно рассматривать как оценку неидеальности раствора, а параметр h связан с избыточной энтальпией смешения раствора, приходящейся на 1 моль растворенного вещества [18]. Известно, что уравнение λh хорошо описывает равновесие многих систем «твердое тело-жидкость» [19-22].

Значения регрессии λ и h и значения RMSD приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что значения, рассчитанные по уравнению λh, лучше согласуются с экспериментальными значениями, чем значения, полученные из других моделей. Значения RMSD не превышают 0,0057. Таким образом, экспериментальная растворимость пиперазина в выбранных органических растворителях при различных температурах может быть коррелирована с помощью уравнения λh.

Термодинамические свойства раствора.

Стандартные термодинамические свойства могут предоставить важную информацию о растворении соединений в растворителе.

Стандартная энтальпия растворения (ΔH_{sol}^o) и стандартная энтропия растворения (ΔS_{sol}^o) могут быть рассчитаны по уравнению Вант-Гоффа [23]. Функции в процессе растворения пиперазина рассчитываются согласно растворимости пиперазина в различных органических растворителях. Стандартная молярная энтальпия растворения (ΔH_{sol}^o) обычно получается из следующего уравнения:

$$\Delta H_{sol}^o = -R \left(\frac{d \ln x}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \right)_p = -R \left(\frac{d \ln x}{d \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{cp}} \right)} \right)_p.$$

Изменение теплоемкости раствора можно считать постоянным в ограниченном интервале температур, исследованном при 20-90 °С. Независимость от температуры энтальпии раствора возникает в результате исчезновения изменения теплоемкости. Следовательно, значения ΔH_{sol} могут быть рассчитаны для средней температуры $T_{cp} = 328,15$ К.

ΔG_{sol}^o рассчитывается следующим образом:

$$\Delta G_{sol}^o = -R \cdot T_{cp} \cdot \ln x',$$

где x' – растворимость при T_{cp} .

Стандартная молярная энтропия (ΔS_{sol}^o) рассчитывается по формуле

$$\Delta S_{sol}^o = \frac{\Delta H_{sol}^o - \Delta G_{sol}^o}{T_{mean}}.$$

Полученные значения ΔH_{sol}^o , ΔG_{sol}^o и ΔS_{sol}^o приведены в табл. 3. Результаты расчета показывают, что тенденция изменения энтальпии растворения у изученных растворителей противоположна изменению растворимости. Положительные значения ΔH_{sol}^o говорят о том, что процесс растворения является эндотермическим. Положительные значения ΔS_{sol}^o для всех исследованных органических сред указывает на энтропийно обусловленный характер процесса растворения.

Таблица 3

Стандартные термодинамические свойства растворения пиперазина в различных органических растворителях

Table 3. Standard thermodynamic properties of piperazine dissolution in various organic solvents

Растворитель	ΔH_{sol}^o , кДж/моль	ΔG_{sol}^o , Дж/моль	ΔS_{sol}^o , Дж/моль·К
<i>n</i> -бутанол	11,3	2,16	28,0
бутилцелло- зольв	10,5	2,05	25,7
метилцелло- зольв	9,8	1,93	24,0
2-(2-метокси)- этоксизтанол	10,3	1,92	25,5
диглим	6,6	1,22	16,4
триглим	8,0	1,44	19,9

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поведение растворимости пиперазина в шести чистых растворителях: *n*-бутаноле, 2-(*n*-бутокси)этанол, 2-метоксизтанол, метилкарбитол, диметилвых эфирах ди- и триэтиленгликоля – экспериментально определяли равновесным методом при разных температурах. Полученные значения растворимости увеличиваются с ростом температуры в следующем порядке: простые эфиры > спирты. Для сопоставления значений растворимости пиперазина в шести органических растворителях используются три модели. Показано, что среднеквадратичное отклонение для уравнения Лх не превышает 0,0057, указанная термодинамическая модель дает более удовлетворительные результаты корреляции с экспериментальными данными о рас-

творимости, чем результаты, полученные с помощью других моделей (уравнения Вант-Гоффа и Апелблата). В выбранных растворителях были рассчитаны значения стандартной молярной энтальпии и изменения молярной энергии Гиббса. Результаты показали, что процесс растворения является эндотермическим и энтропийно обусловленным. Стандартная энтальпия растворения для спиртов составила $10,5 \pm 1$ кДж/моль, для простых эфиров – $7,3 \pm 0,7$ кДж/моль.

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

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

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

- Zhang W., Guo S., Yu L., Wang Ya, Chi R. Y., Wu J. Piperazine: Its role in the discovery of pesticides. *Chinese Chemical Letters*. 2023. V. 34. N 8. 108123. DOI: 10.1016/j.cclet.2022.108123.
- Демидова Ю.В., Демидов П.А., Потехин В.В. О реакционной способности аминогрупп пиперазина при взаимодействии с окисью этилена. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 11. С. 77–81. DOI: 10.6060/ivkkt.20206311.6188. Demidova Yu.V., Demidov P.A., Potekhin V.V. On reactivity of piperazine aminogroups in interaction with ethylene oxide. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 11. P. 77–81. DOI: 10.6060/ivkkt.20206311.6188.
- Jalageri M.D., Akshatha Nagaraja A., Puttaiahgowda Y.M. Piperazine based antimicrobial polymers: a review. *RSC Adv*. 2021. V. 11. P. 15213–15230. DOI: 10.1039/D1RA00341K.
- Демидова Ю.В., Демидов П.А., Потехин В.В. Кинетика оксипропилирования моноэтаноламина. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 3. С. 22–26. DOI: 10.6060/ivkkt.20226503.6542. Demidova Yu.V., Demidov P.A., Potekhin V.V. Monoethanolamine oxypropylation kinetics. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 3. P. 22–26. DOI: 10.6060/ivkkt.20226503.6542.
- Gettys K.E., Ye Z., Dai M. Recent Advances in Piperazine Synthesis. *Synthesis*. 2017. V. 49. N 12. P. 2589–2604. DOI: 10.1055/s-0036-1589491.
- Al-Ghorbani M., Gouda M.A., Baashen M. Piperazine Heterocycles as Potential Anticancer Agents: A Review. *Pharm Chem J*. 2022. V. 56. P. 29–37. DOI: 10.1007/s11094-022-02597-z.
- Fu D., Liu F., Li Z. Surface Tensions of Carbonated 2-Amino- 2- methyl- 1- propanol and Piperazine Aqueous Solutions. *Chemical Engineering & Technology*. 2013. V. 36. N 11. P. 1859–1864. DOI: 10.1002/ceat.201300331.
- Fosbol P.L., Neerup R., Arshad M.W., Tecle Z., Thomsen K. Aqueous Solubility of Piperazine and 2-Amino-2-methyl-1-propanol plus Their Mixtures Using an Improved Freezing-Point Depression Method. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2011. V. 56. N 12. P. 5088–5093. DOI:10.1021/je200959m.
- You Y.J., Gao T., Qiu F.L., Wang Y., Chen X.Y., Jia W.P., Li R.R. Solubility Measurement and Modeling for 2-Benzoyl-

- 3-chlorobenzoic Acid and 1-Chloroanthraquinone in Organic Solvents. *J. Chem. Eng. Data*. 2013. V. 58. P. 1845–1852. DOI: 10.1021/je400246s.
10. Li Q.S., Lu F.H., Tian Y.M., Feng S.J., Shen Y., Wang B.H. Solubility of Veratric Acid in Eight Mono-solvents and Ethanol + 1-Butanol at Various Temperatures. *J. Chem. Eng. Data*. 2013. V. 58. P. 1020–1028. DOI: 10.1021/je400029t.
11. Zhao H.K., Xu H., Yang Z.P., Li R.R. Solubility of 3,4-Dichloronitrobenzene in Methanol, Ethanol, and Liquid Mixtures (Methanol + Water, Ethanol + Water): Experimental Measurement and Thermodynamic Modeling. *J. Chem. Eng. Data*. 2013. V. 58. P. 3061–3068. DOI: 10.1021/je400507u.
12. Patel A., Vaghasiya A., Gajera R., Baluja S. Solubility of 5-Aminosalicylic Acid in Different Solvents at Various Temperatures. *J. Chem. Eng. Data*. 2010. V. 55. P. 1453–1455. DOI: 10.1021/je900646u.
13. Демидова Ю.В., Демидов П.А., Потехин В.В. Использование эффективного углеродного числа в количественном анализе аминоспиртов и полиаминов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 5. С. 30–34. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6548. Demidova Yu.V., Demidov P.A., Potekhin V.V. Quantitative analysis of aminoalcohols and polyamines using effective carbon number. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 5. P. 30–34. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6548.
14. Qiu J., Wang P., Hu S., He H., Huang H., Zhao Y., Han J., Liu H., Guo Y. Solid–Liquid Equilibrium of l-Thioprolin in Nine Neat Solvents and Water + Acetonitrile Binary Solvent System from 283.15 to 323.15 K: Solubility Determination and Data Modeling. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2021. V. 66. N 2. P. 1201–1209. DOI: 10.1021/acs.jced.0c00996.
15. Lan G., Li X., Chao H., Wang N., Wei C., Li Z., Wang J. Measurement and Correlation of Solubilities of 3-Nitro-1,2,4-triazol-5-one (NTO) in 10 Pure Solvents and 3 Binary Solvents from 278.15 to 328.15 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2021. V. 66. N 10. P. 3897–3910. DOI: 10.1021/acs.jced.1c00570.
16. Li J., Yan X., Li X., Chen W., Hao H., Wang N., Huang X. Solubility and Thermodynamic Modeling of 5-Nitrofurazone in Pure Solvents and Binary Solvent Mixtures. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2023. V. 68. N 6. P. 1460–1475. DOI: 10.1021/acs.jced.3c00112.
17. Buchowski H., Ksiazczak A., Pietrzyk S. Solvent activity along a saturation line and solubility of hydrogen-bonding solids. *J. Phys. Chem.* 1980. V. 84. N 9. P. 975–979. DOI: 10.1021/j100446a008.
18. Hu Y., Wang L., Meng Z., Yang W. Measurement and correlation of the solubility of maleic acid in acetone–ethyl acetate mixtures. *Thermochimica Acta*. 2012. V. 538. P. 75–78. DOI: 10.1016/j.tca.2012.03.023.
19. Guo S., Su W., Hao H., Luan Y., Li X., Gao S., Huang X. Solution Thermodynamics of Caprolactam in Different Monosolvents. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2021. V. 66. N 1. P. 494–503. DOI: 10.1021/acs.jced.0c00741.
20. Wang K., Shang Z., Zhang J., Liu Y., Han J., Tang W. Solubility Determination and Thermodynamic Correlation of 2-Ethoxybenzamide in 12 Pure Solvents from 288.15 to 328.15 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2021. V. 66. N 3. P. 1508–1514. DOI: 10.1021/acs.jced.0c01081.
21. Li J., Yao M., Kang X., Yu C., Liu Y., Yan H., Yin H., Chen M. Equilibrium Solubility Determination and Dissolution Property Analysis of 5,6-Dimethoxy-1-indanone in 15 Pure Solvents from 283.15 to 323.15 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2021. V. 66. N 4. P. 1813–1820. DOI: 10.1021/acs.jced.1c00040.
22. Zhang S., Tian N., Jia S., Yang J., Zhou Y., Du S., Gao Z. Solubility Measurement and Data Correlation of Pentaerythritol in Four Binary Solvent Systems at Temperatures from 283.15 to 323.15 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2021. V. 66. N 5. P. 2209–2217. DOI: 10.1021/acs.jced.1c00080.
23. Бадькова Л.А., Мударисова Р.Х., Колесов С.В. Микро-частицы полиэлектролитных комплексов на основе поли-N,N-диаллил-N,N-диметиламмоний хлорида и окисленного арабиногалактана, модифицированных гистидином. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 5. С. 14–22. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6475. Badykova L.A., Mudarisova R.H., Kolesov S.V. Microparticles of polyelectrolyte complexes based on poly-N,N-diallyl-N,N-dimethylammonium chloride and oxidized arabinogalactan modified with histidine. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 5. P. 14–22. (in Russ.). DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6475.

Поступила в редакцию 28.02.2025
Принята к опубликованию 30.07.2025

Received 28.02.2025
Accepted 30.07.2025