

УДК 532.632

ТЕПЛОЕМКОСТЬ ФЕНОЛА И ЕГО ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ

© 2024 г. З.И. Зарипов^а, Р.Р. Накипов^а, С.В. Мазанов^{а, *}, Ф.М. Гумеров^а

^аКазанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

*e-mail: serg989@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.06.2023

После доработки 29.06.2023

Принята к публикации 03.07.2023

Выполнены исследования изобарных теплоемкостей фенола и трех его водных растворов с концентрацией 2, 4 и 5.9 мас.% с использованием сканирующего калориметра (ИТ-с-400) при температурах от 313 до 473 К и давлениях до 19.6 МПа. Проведено сравнение полученных и литературных данных в исследованной области параметров состояния.

Ключевые слова: сканирующий калориметр, высокая температура, высокое давление, изобарная теплоемкость, фенол, водный раствор.

DOI: 10.31857/S0044453724020032, **EDN:** RDVKWA

Мировое сообщество всерьез обеспокоено снижением запасов углеводородного сырья и проблемой загрязнения окружающей среды в процессе его переработки. Одним из важных направлений решения экологических проблем является пристальное внимание к задаче утилизации промышленных водных стоков, которая часто не ограничивается лишь экологической составляющей и дополняется усилиями в направлении не менее важной задачи ресурсосбережения. На сегодняшний день основными поставщиками промышленных водных стоков, загрязняющих в том числе и природные водные ресурсы, являются химическая, целлюлозно-бумажная, текстильная и нефтехимическая промышленности. В частности, на ПАО «Казаньоргсинтез» на фенольном производстве завода «Бисфенол-А» водный сток объемом до 3000 т/год, содержащий фенол – 5 мас.%, ацетон – 3 мас.%, соли – 15 мас.%, воду – 77 мас.%, на протяжении длительного периода времени подвергается лишь термическому обезвреживанию. Эти стоки представляют серьезную опасность для здоровья людей, животных и водных систем. Фенол является одним из наиболее важных промежуточных продуктов в химической промышленности. Он

играет центральную роль в процессах производства бисфенола А, фенолформальдегидных смол или процесса Хока, а также в очистке сточных вод. Фенол действует как загрязнитель даже при очень низких концентрациях в воде. Он является одним из основных, приоритетных загрязнителей, который необходимо очищать перед сбросом в окружающую среду.

Во многих химических процессах разделение смесей является важным этапом. Одним из ярких примеров является очистка продуктов реакции. В частности, большое промышленное значение имеет удаление фенола. Решение проблемы утилизации водного стока на этапе разработки технологии и энерготехнологической оптимизации высокоэффективного СКФ экстракционного процесса с подбором экстрагента, обеспечивающего I–II типы фазового поведения с извлекаемыми компонентами и процесса окисления углеводородных остатков стока в сверхкритической водной среде, невозможно без информации об основных теплофизических свойствах этого водного стока. Существующая база данных по свойствам является далеко не полной. В наличии имеются лишь отдельные теплофизические

свойства некоторых компонентов стока (фенол, вода, ацетон) и экстрагентов (CO_2 , этан, этилен, пропан и некоторые фреоны), которые представлены в литературе [1, 2] в широком диапазоне параметров состояния, охватывающие и область сверхкритического состояния. Но в то же время обзор литературы показывает [2, 3], что существуют очень ограниченные данные о свойствах водных растворов ароматических углеводородов. Несмотря на широкое технологическое распространение, водные растворы фенола очень мало изучены, особенно калорические свойства. Теплоемкость является фундаментальным свойством при термодинамических расчетах тепловых систем и при разработке уравнения состояния. Эксперимент – самый надежный способ получить теплоемкость рабочих жидкостей.

Изобарная теплоемкость фенола при атмосферном давлении в зависимости от температуры изучалась рядом авторов [4–9]. Большинство измерений выполнено методом адиабатической калориметрии с погрешностью в пределах 0.5–2.0 % ниже температуры плавления. Parks и др. [4] сообщили о низкотемпературных (вблизи температуры стеклования), от 93 до 296 К, данных о теплоемкости фенола с использованием анероидного калориметра. Andon и др. [6], используя адиабатический дроп-калориметр, значительно расширили температурный диапазон данных от 10 до 314 К, включая жидкое состояние. Rastorguev и др. [7] сообщили о данных при 317.15–373.15 К и атмосферном давлении. В работе Nichols и др. [8] приводится только одно значение теплоемкости при температуре 298.15 К и атмосферном давлении. Reggon и др. [9] сообщили об избыточной теплоемкости смеси $\text{H}_2\text{O} +$ фенол при 298 К и атмосферном давлении. Origlia-Luster [10] приводит данные о кажущейся молярной теплоемкости смеси $\text{H}_2\text{O} +$ фенол при температурах от 278 до 393 К при давлении 0.35 МПа для молярностей от 0.025 до 0.5 моль/кг. Измерения проводились с использованием калориметра NanoDSC 6100, Calorimetry Sciences Corporation, American Fork, UT, США. Погрешность этих измерений находится в пределах 0.2–1.5 % в зависимости от диапазонов температуры и концентрации. Censky и др. в работе [11] применили проточный калориметр типа Пикера для изучения влияния температуры и давления на изобарную теплоемкость смеси

$\text{H}_2\text{O} +$ фенол. Измерения проводились при температурах от 303 до 623 К и при нескольких давлениях до 30 МПа при четырех концентрациях от 0.15 до 0.81 моль/кг H_2O . Погрешность измерений составляла 2 %. Измеренные значения изобарной теплоемкости (C_{Pm}) использовали для расчета избыточной молярной теплоемкости (C_{Pm}^E) и оценки парциальной молярной теплоемкости при бесконечном разбавлении ($C_{P,2}^0$). Плотность и избыточные молярные объемы (фенол + вода) в зависимости от температуры и давления изучались многими авторами [10–14]. *PVT*-свойства смеси при высоких температурах и давлениях изучались в нескольких работах [11, 12–14]. В работе Origlia-Luster и др. [10] приведены измеренные плотности и избыточные молярные объемы (вода + фенол) при температурах от 278.15 до 368.15 К и давлении 0.35 МПа. Измерения проводились с использованием коммерческого денситометра VTD DMA 512p Anton Paar. Данные измерений использовались для расчета избыточных молярных объемов при высоких температурах и давлении 0.35 МПа. В работе Hunek и др. [12] приведены данные плотности разбавленных водных растворов фенола и получены парциальные и избыточные молярные объемы при высоких температурах от 298 до 573 К и давлениях до 35 МПа. Измерения были выполнены с помощью денситометра VTD с потоком при высоких температурах и высоких давлениях. Они вместе с другими опубликованными данными [13, 14] были использованы для расчета значений теплоемкости.

Таким образом, основной целью настоящей работы является получение достоверных экспериментальных данных по изобарной теплоемкости фенола и водных растворов фенола в широком интервале температур (от 313.15 до 473.15 К) и при давлениях до 19.6 МПа для трех водных составов (2, 4 и 5.9 мас.%).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. Образец фенола (номер CAS 108-95-2, химическая формула $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$, молекулярная масса $M = 94.11 \text{ г} \times \text{моль}^{-1}$), использованный в настоящем исследовании, был предоставлен компанией ЗАО «Вектон» (Россия) и использован без дополнительной очистки. Заявленная чистота образца > 0.99 массовых долей (ГЖХ), показатель преломления ($n_D^{45} = 1.5472$), плотность ($\rho_{45}^4 = 1006 \text{ кг/м}^3$). Данные по плотности

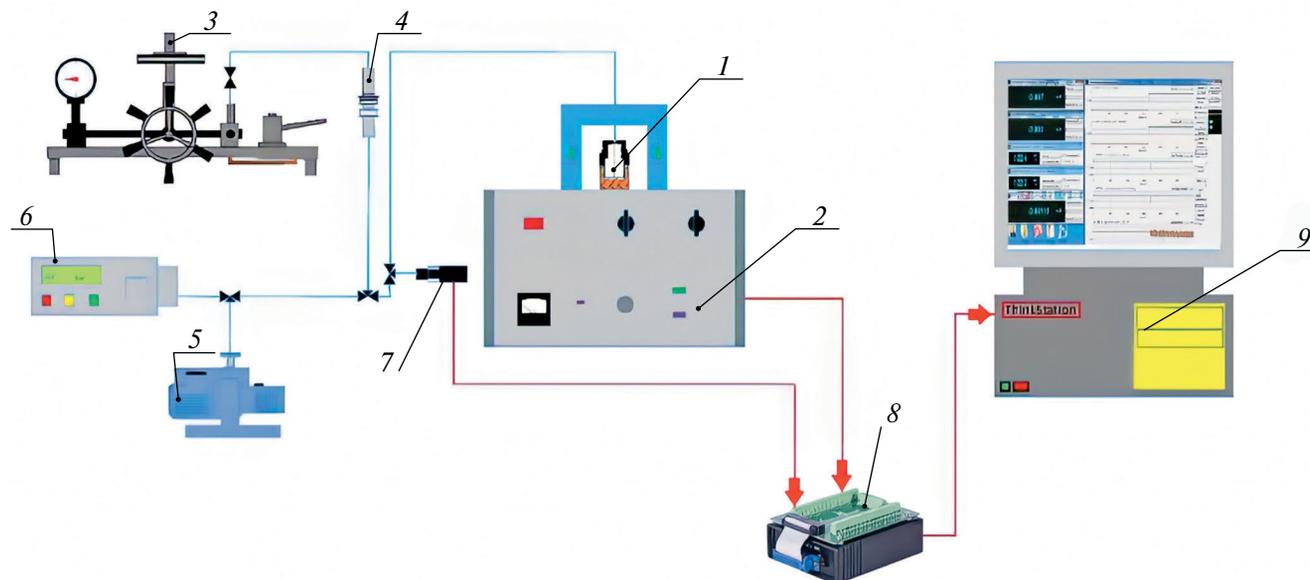


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по измерению изобарной теплоемкости: 1 – измерительная ячейка, 2 – измерительный комплекс ИТ-с-400, 3 – грузопоршневой манометр, 4 – разделительный сильфонный узел, 5 – вакуумный насос, 6 – жидкостный насос, 7 – тензотриггерный датчик давления, 8 – аналогово-цифровой преобразователь, 9 – персональный компьютер.

и показателю преломления были предоставлены поставщиком. Все образцы дегазировали при низких давлениях.

Аппаратура и процедуры. Аппаратура и экспериментальные процедуры были ранее описаны в предыдущих работах [15–17]. Измерения изобарной теплоемкости фенола были выполнены с использованием сканирующего калориметра (ИТ-с-400) с системой автоматического сбора данных (рис. 1).

Расчетное уравнение для определения изобарной теплоемкости по методу сканирующего калориметра имеет следующий вид [16]:

$$C_p(P, T) = C_p''(P_0, T) \frac{g''}{g} \frac{\tau - \tau_0}{\tau'' - \tau_0}, \quad (1)$$

где $C_p(P, T)$, $C_p''(P_0, T)$ – изобарные теплоемкости исследуемого образца при заданных давлении (P) и температуре (T) и стандартного (эталонного) образца при той же температуре (T) и эталонном давлении (P_0) соответственно, кДж/(кг К); g и g'' – масса исследуемого образца и контрольной жидкости соответственно, кг; t и t'' – времена запаздывания измерительных термопар для исследуемого образца и эталонной жидкости соответственно, с; t_0 – время задержки измерительной термопары для пустой ячейки, с. Как можно заметить из уравнения

(1), для расчета изобарной теплоемкости исследуемого образца требуются надежные данные теплоемкости эталонного образца как функции температуры при фиксированном давлении P_0 (обычно атмосферном). Уравнение (1) применимо для расчета теплоемкости при давлениях до 30 МПа и в диапазоне температур от 298 до 473 К. В настоящей работе использован относительный вариант методики измерений с ячейкой постоянного объема [17]. Скорость нагрева составляла 10 К/мин. Расширенная погрешность измерений теплоемкости, давления и температуры при уровне достоверности 95 % с коэффициентом охвата $k = 2$ оценивается в 2.4 и 0.05 %, 15 мК соответственно. Погрешность теплоемкости включает также погрешность процедуры калибровки.

Тестовые измерения. Достоверность и точность данных измеренной теплоемкости исследуемого образца, адекватности работы установки подтверждены измерениями теплоемкости жидкостей с хорошо известными и надежными, доступными экспериментальными данными. Результаты тестовых измерений подробно изложены в одной из недавних работ авторов статьи [17]. Согласно этим испытаниям, соответствие тестовых измерений теплоемкости воды [18] находится в пределах средних абсолютных относительных отклонений AAD = 0.25 % в диапазоне

температур от 333 до 453 К и при выбранном давлении 24.5 МПа, а для н-гептана [19] и 1-бутанола [20] – в пределах AAD = 0.43 % и AAD = 0.88% при давлениях 9.8 и 18.38 МПа соответственно. Как видно, отклонения находятся в пределах экспериментальной погрешности метода. Хорошее соответствие между настоящими измерениями и эталонными данными теплоемкости жидкостей с использованием настоящего прибора (рис. 1) подтверждает надежность и точность данных измерения теплоемкости фенола.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Измеренные значения изобарной теплоемкости фенола и водных растворов в зависимости от температуры и давления в диапазоне температур 343–473 К и при давлениях от 0.098 до 19.6 МПа представлены в табл. 1.

Корреляция теплоемкости. Измеренные значения теплоемкости (табл. 1) фенола и водных растворов были аппроксимированы функцией полиномиального типа:

Таблица 1. Теплоемкость (C_p) фенола и водных растворов в зависимости от температуры (T) и давления (P)

T , К	$P=0.098$ МПа	$P=4.9$ МПа	$P=9.8$ МПа	$P=14.7$ МПа	$P=19.6$ МПа
	C_p кДж/(кг К)				
	Фенол				
343.15	2.203	-	-	-	-
353.15	2.217	2.206	2.189	2.173	2.157
363.15	2.241	2.229	2.212	2.196	2.181
373.15	2.281	2.253	2.237	2.222	2.206
383.15	2.292	2.279	2.263	2.248	2.233
393.15	2.328	2.306	2.291	2.276	2.261
403.15	2.347	2.335	2.320	2.305	2.291
413.15	2.383	2.365	2.350	2.336	2.322
423.15	2.410	2.397	2.382	2.368	2.354
433.15	2.433	2.430	2.415	2.401	2.387
443.15	2.479	2.464	2.449	2.435	2.422
453.15	2.523	2.500	2.485	2.471	2.458
463.15	2.544	2.537	2.522	2.508	2.495
473.15	-	2.576	2.561	2.546	2.533
	2 мас.% ($m=0.217$ моль/кг H_2O) водный раствор фенола				
313.15	-	4.151	4.140	4.129	4.119
323.15	-	4.154	4.143	4.134	4.123
333.15	-	4.159	4.148	4.139	4.129
343.15	-	4.164	4.154	4.144	4.135
353.15	-	4.171	4.161	4.150	4.141
363.15	-	4.179	4.169	4.158	4.148
373.15	-	4.190	4.179	4.168	4.158
383.15	-	4.202	4.190	4.179	4.169
393.15	-	4.217	4.205	4.193	4.182
403.15	-	4.234	4.221	4.209	4.197
413.15	-	4.254	4.240	4.227	4.214
423.15	-	4.278	4.263	4.248	4.234
433.15	-	4.305	4.288	4.272	4.257

T, К	P=0.098 МПа	P=4.9 МПа	P=9.8 МПа	P=14.7 МПа	P=19.6 МПа
	C_p кДж/(кг К)				
443.15	-	4.336	4.318	4.300	4.283
453.15	-	4.372	4.352	4.332	4.313
463.15	-	4.413	4.390	4.368	4.347
473.15	-	4.461	4.434	4.409	4.385
4 мас.% ($m = 0.443$ моль/кг H ₂ O) водный раствор фенола					
313.15	-	4.135	4.123	4.112	4.101
323.15	-	4.138	4.127	4.116	4.106
333.15	-	4.148	4.132	4.122	4.112
343.15	-	4.153	4.138	4.128	4.118
353.15	-	4.155	4.145	4.135	4.125
363.15	-	4.164	4.153	4.143	4.133
373.15	-	4.174	4.163	4.153	4.142
383.15	-	4.187	4.175	4.164	4.153
393.15	-	4.202	4.189	4.178	4.166
403.15	-	4.219	4.206	4.193	4.181
413.15	-	4.239	4.225	4.212	4.199
423.15	-	4.262	4.246	4.233	4.219
433.15	-	4.289	4.272	4.256	4.241
443.15	-	4.320	4.301	4.284	4.267
453.15	-	4.356	4.335	4.315	4.296
463.15	-	4.397	4.373	4.351	4.330
473.15	-	4.443	4.417	4.391	4.368
5.9 мас.% ($m = 0.667$ моль/кг H ₂ O) водный раствор фенола					
333.15	-	4.112	4.100	4.089	4.075
343.15	-	4.119	4.105	4.092	4.078
353.15	-	4.126	4.111	4.096	4.081
363.15	-	4.133	4.116	4.099	4.082
373.15	-	4.141	4.123	4.104	4.086
383.15	-	4.152	4.131	4.111	4.091
393.15	-	4.164	4.142	4.120	4.097
403.15	-	4.178	4.154	4.130	4.106
413.15	-	4.194	4.168	4.142	4.116
423.15	-	4.212	4.184	4.156	4.127
433.15	-	4.232	4.201	4.171	4.141
443.15	-	4.253	4.220	4.188	4.156
453.15	-	4.276	4.241	4.206	4.172
463.15	-	4.301	4.264	4.227	4.190
473.15	-	4.327	4.288	4.249	4.210

Таблица 2. Коэффициенты a_j полинома (2) для расчета теплоемкости фенола и водных растворов в диапазоне температур от 333.15 до 473.15 К и давлений от 0.098 до 19.6 МПа

Коэффициенты a_j полинома	Фенол	2 мас.% водный раствор	4 мас.% водный раствор	5.9 мас.% водный раствор
a_0 , кДж/(кг К)	2.278	5.393	5.3576	4.829
a_1 , кДж/(кг К ²)	-2.551×10^{-6}	-7.784×10^{-3}	-7.662×10^{-3}	-4.808×10^{-3}
a_2 , кДж/(кг К МПа)	-5.145×10^{-6}	3.378×10^{-3}	2.835×10^{-3}	1.092×10^{-2}
a_3 , кДж/(кг К ² МПа)	5.109×10^{-6}	-1.653×10^{-5}	-1.579×10^{-5}	-3.958×10^{-5}
a_4 , кДж/(кг К ³)	6.773×10^{-6}	1.231×10^{-5}	1.214×10^{-5}	8.085×10^{-6}
a_5 , кДж/(кг К МПа ²)	–	1.161×10^{-5}	2.011×10^{-5}	–
St. Dev, %	0.29	0.12	0.53	0.17
AAD, %	0.06	0.10	0.10	0.02

$$C_p(P, T) = a_0 + a_1T + a_2P + a_3PT + a_4T^2 + a_5P^2, \quad (2)$$

где $C_p(P, T)$ – изобарная теплоемкость при заданных P и T , кДж/(кг К); a_i ($i = 0..5$) – подгоночные параметры.

На рис. 2 показаны измеренные значения теплоемкости фенола в зависимости от температуры при атмосферном давлении вместе с литературными данными [6, 21–23].

Оптимальные значения полученных подгоночных параметров вместе со статистикой отклонений приведены в табл. 2.

Как видно из таблицы, корреляционное уравнение (2) представляет текущие данные по теплоемкости для фенола в пределах их экспериментальной погрешности (AAD = 0.20 %), включая значения C_p при высоком давлении. При атмосферном давлении отклонения между рассчитанными по корреляционному уравнению (2) и текущие измеренные данные $C_p(P, T)$ находятся в пределах AAD = 0.19 % (среднеквадратичное отклонение St. Dev = 0.64 % и максимальное отклонение Max.Dev = 0.28 %).

СРАВНЕНИЕ С ЛИТЕРАТУРНЫМИ ДАННЫМИ

Теплоемкость фенола. Прямое сравнение настоящих данных по теплоемкости для фенола с литературными данными невозможно из-за различий между настоящими и опубликованными экспериментальными температурами и давлениями. Мы использовали процедуру интерполяции – корреляционное уравнение (2).

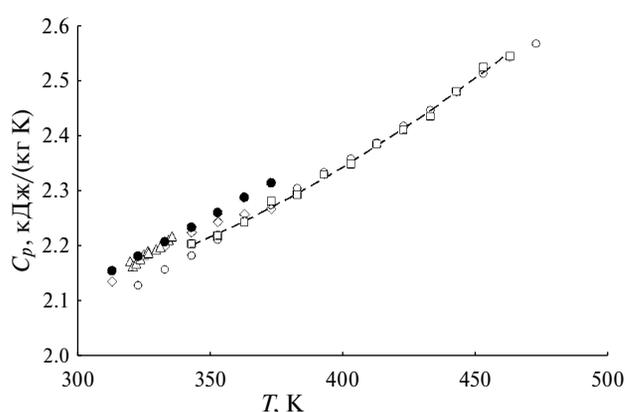


Рис. 2. Теплоемкость при атмосферном давлении фенола: пунктир – расчет по уравнению (2), □ – настоящая работа, Δ – Andon [6], ○ – Гурвич [21], ◇ – Zabransky [22], • – Ruzicka [23].

Разработанное уравнение (2) было использовано для сравнения настоящих данных по теплоемкости для фенола с опубликованными экспериментальными (Andon [6]), обобщенными (Гурвич [21], Zabransky [22]) и расчетными данными (Ruzicka [23]). Как видно из рис. 2, данные C_p , представленные в [6], систематически выше текущих измерений C_p на AAD = 0.85 % (St. Dev = 0.92 %). На рис. 3 показаны процентные отклонения (график отклонения) между уравнением корреляции (2), а также настоящими и другими опубликованными данными по теплоемкости при атмосферном давлении.

Как показано на рис. 3, настоящие и все другие представленные данные при атмосферном давлении хорошо согласуются при температурах от комнатной до 380 К (все отклонения – не более 2.4 %).

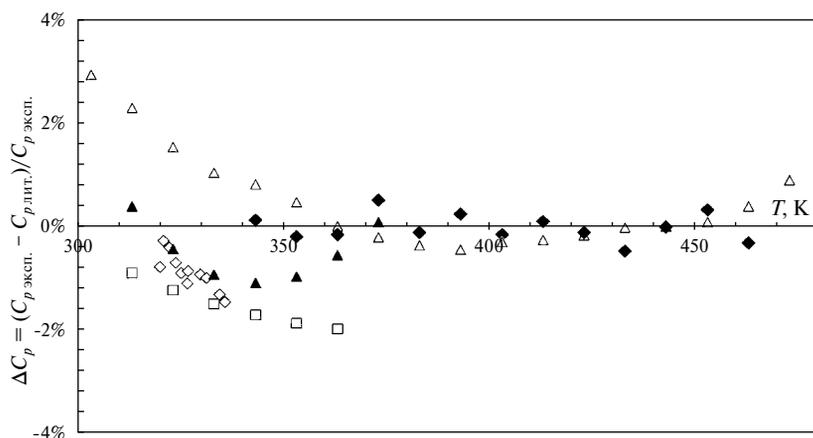


Рис. 3. Отклонения ΔC_p всех доступных данных изобарной теплоемкости фенола от уравнения (2) в зависимости от температуры при атмосферном давлении: ◆ - настоящая работа; ◊ - Andon [6]; Δ - Гурвич [21]; ◻ - Zabransky [22]; ◻ - Ruzicka [23].

Таблица 3. Сводка всех основных изобарных данных по теплоемкости фенола, а также их стандартных отклонений (St.Err.), средних абсолютных относительных отклонений (AAD) и максимальных относительных отклонений (MADD) по отношению к уравнению (2) при атмосферном давлении

Авторы	St. Err, %	ADD, %	MADD, %
Andon [6]	0.92	0.85	1.43
Гурвич [21]	0.48	0.36	1.08
Zabransky [22]	0.70	0.62	1.06
Ruzicka [23]	1.45	1.36	1.85
Настоящая работа	0.24	0.20	0.52

В табл. 3 представлены различные отклонения значений теплоемкостей, полученных в настоящей работе, от величин, найденных в работах авторов.

Как можно заметить из табл. 3, большинство представленных данных отклоняются от текущих результатов в пределах AAD (от 0.36 до 1.36 %), т. е. в пределах существующей экспериментальной погрешности (2.4 %). Большинство измеренных данных по теплоемкости систематически ниже, чем настоящие измерения. Что касается прямых измерений теплоемкости фенола при высоком давлении, то они отсутствуют.

Теплоемкость водных растворов (2; 4; 5.9 мас.%) фенола. Уравнение (2) было использовано для подробного сравнения настоящих данных по теплоемкости для водных растворов с опубликованными экспериментальными данными (Origlia-Luster [10] и M. Censky [11]), пересчитанными из избыточной мольной теплоемкости C_{Pm}^E в удельную массовую теплоемкость C_p по формуле:

$$C_p = \frac{C_{Pm}^E + \frac{C_p^*}{m}}{M + m^{-1}}, \quad (3)$$

где C_{Pm}^E – избыточная мольная теплоемкость, кДж/(кмоль К); C_p^* – теплоемкость воды, кДж/(кг К); m – моляльность раствора, кмоль/кг; M – молярная масса растворенного вещества, H_2O кг/кмоль.

На рис. 4 показаны процентные отклонения между уравнением корреляции (2), а также настоящими и другими опубликованными данными по теплоемкости 4 % водного раствора.

Как видно из рис. 4, данные C_p при давлении $P = 0.35$ МПа, представленные Origlia-Luster [10], систематически выше текущих измерений C_p на AAD = 0.56 % (St. Dev = 0.57 %). Как показано на рис. 4, согласие с данными M. Censky [11] при давлении 0.1 и 2.2 МПа не превышает ± 1 %. Экстраполяция уравнения (2) за пределы диапазона измерения до 30.1 МПа показала отклонение от данных [11] в пределах 1.15 %.

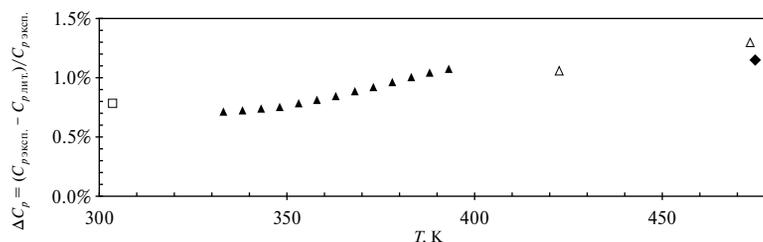


Рис. 4. Отклонения всех доступных данных изобарной теплоемкости 4 % водного раствора фенола от уравнения (2) в зависимости от температуры и давления: \blacktriangle – M.L. Origlia-Luster, $P = 0.35$ МПа [10]; \square – M. Censky, $P = 0.1$ МПа [11]; \triangle – M. Censky, $P = 2.1$ МПа [11]; \blacklozenge – M. Censky, $P = 30.1$ МПа [11].

Таблица 4. Сводка всех основных изобарных данных о теплоемкости водных растворов фенола, а также их стандартных отклонений (St. Err), средних абсолютных относительных отклонений (AAD) и максимальных относительных отклонений (MAAD) по отношению к уравнению (2)

Авторы	2 % водный раствор			4 % водный раствор			5.9 % водный раствор		
	St.Err, %	ADD, %	MADD, %	St.Err, %	ADD, %	MADD, %	St.Err, %	ADD, %	MADD, %
M.L. Origlia-Luster [10]	0.68	0.53	1.07	0.57	0.56	0.82	0.17	0.14	0.36
M. Censky [11]	0.73	0.53	1.29	0.28	0.24	0.41	0.99	0.65	1.93

Аналогичная картина наблюдается и для других концентраций. Несколько большее отклонение отмечено у 5.9 % водного раствора фенола.

В табл. 4 представлены различные отклонения настоящей работы от работ авторов.

ВЫВОДЫ

Настоящая работа значительно расширяет ранее сообщавшиеся $C_p = f(P, T, x)$ данные при высоких давлениях (до 19.6 МПа) и температурах (до 473 К). Эта работа также является первым отчетом о прямых измерениях изобарной теплоемкости фенола под давлением с использованием дифференциального сканирующего калориметра. Разработано уравнение корреляции, которое представляет экспериментальные данные по теплоемкости фенола и водных растворов с погрешностью 0.6 % в широком диапазоне температур. Таким образом, настоящее исследование значительно расширяет диапазоны температур, давлений и концентраций литературных данных по изобарной теплоемкости фенола и его растворов с водой. Было обнаружено хорошее согласие в пределах AAD = 2 % между настоящими и наиболее надежными опубликованными данными в перекрывающихся диапазонах температур и давлений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-19-00117; https://rscf.ru/prjcard_int?22-19-00117).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1972. 721 с.
2. Thermophysical Properties of Fluid Systems [Электронный ресурс]. URL: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
3. Frenkel M., Chirico R., Diky V. et al. NIST Thermo Data Engine, NIST Standard Reference Database 103b-Pure Compound, Binary Mixtures, and Chemical Reactions, Version 5.0, National Institute Standards and Technology. Boulder, Colorado-Gaithersburg. MD. 2010.
4. Parks G.S., Huffman H., Barmore M. // J. Am. Chem. Soc. 1933. V. 55. № 7. P. 2733.
5. Campbell A.N., Campbell A.J.R. // Ibid. 1940. V. 62. P. 291.
6. Andon R.J.L., Counsell J.F., Herington E.F.G. et al. // Trans. Faraday Soc. 1963. V. 59. P. 830.
7. Rastorguev Yu.L., Ganiev Yu.A. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Neft Gaz. 1967. V. 10. P. 79.
8. Nichols N., Wads I. // J. Chem. Thermodynamics. 1975. V. 7. P. 329.

9. Perron G., Desnoyers J.E. // Fluid Phase Equilibria. 1979. V. 2. P. 239.
10. Origlia-Luster M.L., Ballerat-Busserolles K., Merkley E.D. et al. // J. Chem. Thermodynamics. 2003. V. 35. P. 331.
11. Censky M., Hnedkovsky L., Majer V. // J. Chem. Thermodynamics. 2005. V. 37. P. 205.
12. Hynek V., Hnedkovsky L., Cibulka I. // Ibid. 1997. V. 29. P. 1237.
13. Criss C.M., Wood R.H. // J. Chem. Thermodynamics. 1996. V. 28. P. 723.
14. Censky M., Sedlbauer J., Majer V. et al // Geochim. Cosmochim. Acta. 2007. V. 71. P. 580.
15. Usmanov R.A., Gabitov R.R., Biktashev S.A. et al. // Russ. J. Phys. Chem B. 2011. V. 5. P. 1216.
16. Zaripov Z.I., Aetov A.U., Nakipov R.R. et al. // J. Mol. Liquids. 2020. V. 307. P. 112935.
17. Zaripov Z.I., Aetov A.U., Nakipov R.R. et al. // J. Chem. Thermodynamics. 2021. V. 152. P. 106270.
18. Wagner W., Pruß A. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2002. V. 31. P. 387.
19. Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O. NIST Standard Reference Database 23. NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties, REFPROP, version 10.0. Standard Reference Data Program. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg. MD. 2018.
20. Naziev Y.M., Shakhverdiev A.N., Bashirov M.M. et al // High Temp. 1994. V. 32. P. 936.
21. Гурвич В.Л. Сосновский Н.П. Избирательные растворители в переработке нефти. М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1953. 320 с.
22. Zabransky M., Kolska Z., Ruzicka V. et al. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2010. V. 39. P. 404.
23. Zabransky M., Ruzicka V. // Ibid. 2004. V. 33. № 4. P. 1071.