

УДК 536.4:541.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ БРОМИДА ЛИТИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР И КОНЦЕНТРАЦИЙ*

В.А. ГРУЗДЕВ, А.В. СЕРЯКОВ

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск*

Изобарная теплоемкость водных растворов бромида лития изучена экспериментально в интервале температур от 0 до 200 °С для 19 концентраций от 2 до 65 % масс. LiBr. Измерения проведены на автоматизированном изотермическом калориметре методом периодического нагрева. Погрешность полученных данных равна 0,25–0,30 % при температурах до 150 °С и 0,7–1,0 % при 200 °С. Рассчитаны таблицы плотности растворов бромида лития в том же диапазоне температур и концентраций на основе более полного массива экспериментальных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Система бромид лития + вода давно привлекает внимание ученых и инженеров как перспективное рабочее вещество для мощных кондиционеров и холодильных машин, работающих по абсорбционному циклу. В связи с этим, свойства этой системы до 100–130 °С достаточно хорошо изучены и опубликованы в термодинамических таблицах [1–4], а также в справочниках [5, 6] и др. В последнее десятилетие рассматриваются проекты использования системы LiBr + H₂O в трансформаторах тепла при температурах до 200 °С и выше. В обзоре [7] показано, что термодинамические свойства растворов бромида лития при температурах выше 130–150 °С исследованы крайне недостаточно. Например, отсутствуют экспериментальные данные о плотности этих растворов, а опубликованные данные о их теплоемкости весьма противоречивы и относятся к области высоких концентраций LiBr (более 30–40 масс. %).

В настоящей работе получены экспериментальные данные об изобарной теплоемкости системы LiBr + H₂O в диапазоне температур от 0 до 200 °С с шагом по температуре ~ 10 °С для 19 значений концентрации LiBr от 2 до 65 масс. %. Зависимость экспериментальных значений теплоемкости от температуры аппроксимирована интерполяционными уравнениями со стандартными отклонениями $\pm 0,15 \div 0,2$ %, не превышающими погрешность полученных экспериментальных данных. В статье также приведены рассчитанные нами значения плотности растворов в интервале температур от 0 до 200 °С, которые были использованы для расчета удельной (массовой) теплоемкости по измеренным значениям объемной теплоемкости.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 04-02-16302).

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерения выполнены методом периодического нагрева в режиме с изотермической оболочкой [8] на автоматизированном калориметре [9, 10]. Устройство калориметра показано на рис. 1. Оболочка калориметрической ячейки, три одинаковые гильзы, сваренные в ее крышку, и мешалка изготовлены из титанового сплава. В двух гильзах находятся включенные последовательно электрические нагреватели из титановой пленки с общим сопротивлением ~ 185 Ом. В третьей размещены малогабаритный терморезистор СТЗ-19 для измерения разности температур и образцовый платиновый термометр сопротивления ПТС-10, используемый для измерения абсолютной температуры и градуировки терморезистора. С целью снижения инерционности датчиков температуры и нагревателей обращено особое внимание на обеспечение их хорошего теплового контакта с гильзами. Мешалка, расположенная внизу ячейки, вращается со скоростью ~ 4 об/с с помощью электромагнитных катушек и специального генератора сдвинутых по фазе импульсов. Калориметрическая ячейка находится в стальной оболочке, в которой во время измерений создается вакуум $\sim 10^{-5}$ Торр. Разность температур между ячейкой и оболочкой измеряется с помощью трехспайной дифференциальной термопары (на рис. 1 не показана). Температура оболочки при проведении калориметрического опыта поддерживается постоянной (в пределах $\pm 0,001$ °C) с помощью жидкостного термостата объемом ~ 40 л. Особенностью калориметра является наличие дренажной трубки, с помощью которой в ячейке устанавливается постоянный уровень раствора. Объем выше уровня раствора, заполненный паром и газом, составляет менее 1 % от объема ячейки, который равен $V_{20} = 417,92$ см³. Экран (вкладыш из фторопласта) препятствует появлению конвекции при высоких давлениях и примерно в два раза уменьшает массу парогазовой смеси. С помощью аргона, подаваемого через газовую трубку, в ячейке устанавливается необходимое давление выше давления пара над раствором: 1 бар в опытах до 90 °C, 5 бар — до 130 °C, 10 бар — до 170 °C и 15 бар — выше 170 °C.

Калориметрический опыт можно разделить на три периода [10]: начальный, главный и конечный. В начальном периоде в калориметрической ячейке устанавливается термодинамическое равновесие (температура ячейки практически постоянна и равна температуре изотермической оболочки). В главном периоде включается нагреватель, и раствор подогревается примерно на 2 °C. В конечном (нагреватель выключен) — в ячейке снова устанавливается термодинамическое равновесие в квазистационарном режиме ее медленного охлаждения. Длительность каждого из первых двух периодов равнялась 15 мин, конечного — $20 \div 25$ мин.

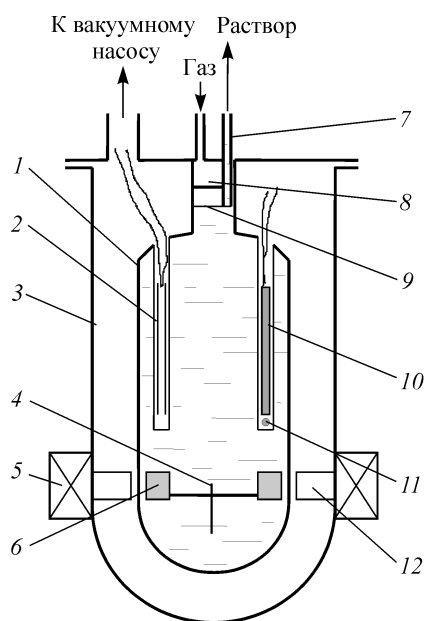


Рис. 1. Устройство калориметра.

1 — оболочка калориметрической ячейки, 2 — гильза с электрическим нагревателем, 3 — изотермическая оболочка, 4 — мешалка, 5 — катушки электромагнитного привода мешалки, 6 — магниты, 7 — дренажный капилляр, 8 — экран, 9 — уровень раствора, 10 — гильза с платиновым термометром ПТС-10, 11 — терморезистор СТЗ-19, 12 — наконечники электромагнитов.

Измерения на калориметре проводились с помощью автоматизированной измерительной системы с шагом по времени 30 с. По результатам измерений восстанавливали истинную температурную кривую калориметра (с учетом инерционности датчиков температуры и нагревателя). Так как масса жидкости в ячейке не остается постоянной при изменении температуры (открытая система), уравнение сохранения энергии для калориметрической ячейки, пренебрегая теплоемкостью пара и газа, можно написать в виде

$$\begin{aligned} (C_k + V_k \cdot \rho C)(T_F - T_I) + K_k \int \vartheta(\tau) d\tau + Q_{\text{исп}} = \\ = \int W_H(\tau) d\tau + (W_M + W_D)(\tau_F - \tau_I). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь V_k и C_k — объем ячейки и ее собственная теплоемкость (тепловой эквивалент), ρC — объемная изобарная теплоемкость жидкости, K_k и $\vartheta(\tau)$ — коэффициент теплопередачи и разность температур между ячейкой и оболочкой, $W_H(\tau)$ — мощность нагревателя, W_M и W_D — мощность диссипации энергии мешалки и суммарная мощность тепловыделений в датчиках температуры, $Q_{\text{исп}}$ — небольшая поправка на испарение жидкости, T — абсолютная температура ячейки, τ — время. Индексы I и F относятся к начальной и конечной точкам на температурной кривой калориметра соответственно. Интегралы в (1) вычисляются от τ_I до τ_F . Время τ_I обычно совпадает с моментом включения нагревателя, а $\tau_F = \tau$ (выключения) + (15 ÷ 20) мин. Значения величин в формуле (1), зависящие от температуры, берутся для средней температуры калориметрического опыта:

$$T = [T_I (\text{ПТС-10}) + T_F (\text{ПТС-10})]/2.$$

КАЛИБРОВКА КАЛОРИМЕТРА

Калибровочные опыты проведены при температурах от 0 до 190 °С с шагом 10 °С на воде, термодинамические свойства которой рассчитывали по уравнениям из [11, 12]. По результатам этих опытов были определены теплоемкость ячейки C_k , и инерционные характеристики нагревателя и датчиков температуры (времена запаздывания): $\tau_{\text{зап}} (\text{ПТС-10}) = 4 \div 1$ мин, $\tau_{\text{зап}} (\text{СТЗ-19}) = 2 \div 1$ мин, $\tau_{\text{зап}} (\text{нагревателя}) = 0,7 \div 0,3$ мин, где большие значения относятся к температуре ~ 0 °С, меньшие — к 190 °С. Полученные значения для теплоемкости ячейки были аппроксимированы уравнением

$$C_k(T) = 153,5 + 0,033 \cdot (T - 273,15) - 4 \cdot 10^{-7} \cdot T^{-3}, \text{ Дж/К}. \quad (2)$$

Коэффициент теплопередачи K_k рассчитывался по темпу охлаждения ячейки при выключенном нагревателе с погрешностью ~ 5 ÷ 10 %. Мощность диссипации энергии, выделяемой мешалкой W_M , — по изменению температуры в начальном периоде с погрешностью ~ 40 %. При 25 °С W_M составляла около $5 \cdot 10^{-3}$ Вт, однако она быстро возросла с понижением температуры и достигала $(25 \div 30) \cdot 10^{-3}$ Вт вблизи 0 °С.

Градуировка терморезистора СТЗ-19, полученная сравнением его показаний с показаниями ПТС-10 в начальном периоде, с большой точностью аппроксимирована уравнением

$$1/T_{\text{СТЗ}} = C0 + C1 \cdot x + C3 \cdot x^3 + C4 \cdot x^4, \quad (3)$$

где $x = \ln(R_{CT3}) - 7,63$, R_{CT3} — сопротивление терморезистора в Ом. Второй член с x^2 опущен, так как характеристика СТЗ-19 при $\ln(R_{CT3}) = 7,63$ имеет точку перегиба. Погрешность расчета разности температур по (3) не превышает 0,0005 °С.

Поправка $Q_{исп} = r \cdot \Delta G_{исп}$, где $\Delta G_{исп}$ — масса испарившейся за время калориметрического опыта жидкости, а r — энтальпия испарения. Как показали расчеты, благодаря малой величине парогазового объема максимальное значение этой поправки (при 190 °С) не превышает 1,5 % от подводимой к ячейке энергии и быстро уменьшается с понижением температуры (примерно в 10 раз на каждые 50 °С).

Полученные в калибровочных опытах значения характеристик калориметра и датчиков температуры были использованы в “обратных” расчетах изобарной теплоемкости воды по результатам первичных измерений. Отклонения полученных данных от табличных имели характер случайных погрешностей и не превышали $\pm 0,2 \div 0,3$ %. Максимальные отклонения наблюдались при температурах ниже 20 °С и выше 180 °С из-за низкой точности расчета поправок W_M и $Q_{исп}$ соответственно. Калибровочные опыты повторялись три раза с интервалом в 6 и 9 месяцев. Они показали хорошую временную стабильность основных характеристик калориметра V_k и C_k , градуировки СТЗ-19 (3) и инерционных характеристик датчиков температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерения проведены на растворах, приготовленных из бидистиллированной воды и безводной соли бромида лития марки ХЧ с содержанием основного продукта по ТУ не менее 99,1 масс. %. Соль предварительно подвергалась очистке путем двойной перекристаллизации из водного раствора при температурах не выше 70 °С. Концентрацию раствора определяли по зависимости плотности от концентрации после завершения измерений теплоемкости. Раствор сливали из калориметра в закрытую посуду, охлаждали и измеряли его плотность при 20 °С с помощью стандартных денсиметров и пикнометров объемом $\sim 30 \text{ см}^3$. Погрешность измерения плотности не превышала соответственно $\pm 0,001$ и $\pm 0,0005 \text{ г/см}^3$, а погрешность определения концентрации по таблицам плотности [5] — соответственно $\pm 0,1$ и $\pm 0,05$ масс. %. Растворы с концентрацией более 35 % предварительно разбавляли до ~ 20 % и измеряли плотность разбавленного раствора. Концентрацию исходного раствора рассчитывали по концентрации разбавленного и известной степени разбавления.

Объемная теплоемкость исследована на растворах 19 концентраций от 2 до 64,51 масс. % в интервале температур от 0–10 °С до 190–195 °С. Поскольку в калибровочных опытах в качестве эталонного вещества использовался растворитель (вода), обработка измерений на растворах производилась в относительном варианте (относительно воды). Результаты измерений и их обработки показаны на рис. 2 в координатах $\rho C_p / \rho_0 C_{p0} - 1000/T$, где индекс 0 показывает, что величина относится к воде, а T выражена в К. Таблица измеренных значений $\rho C_p / \rho_0 C_{p0}$ не представлена из-за большого объема. Сплошные кривые на рис. 2 — результаты аппроксимации температурной зависимости отношения $\rho C_p / \rho_0 C_{p0}$ полиномами

$$\rho C_p / \rho_0 C_{p0} = A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3 + A_4 x^4, \quad (4)$$

где $x = 1000/T$. Коэффициенты полиномов (4) для всех концентраций представлены в табл. 1. Из этой таблицы видно, что стандартные отклонения (СКО) экспериментальных точек от аппроксимирующих уравнений, приведенные в последней колонке, не превышают $0,15 \div 0,2$ %.

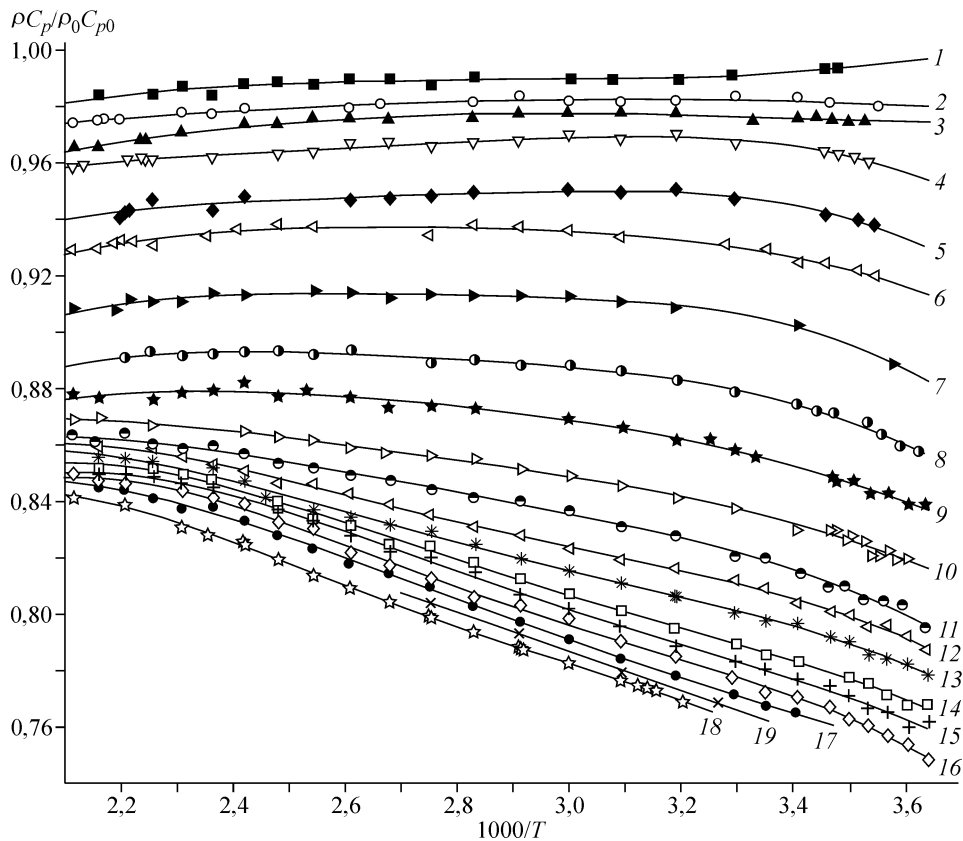


Рис. 2. Изменение отношения объемной теплоемкости раствора к объемной теплоемкости воды в зависимости от температуры и концентрации LiBr (масс. %): 2,00 (1), 3,73 (2), 5,53 (3), 7,68 (4), 11,09 (5), 15,68 (6), 21,17 (7), 26,65 (8), 31,09 (9), 35,48 (10), 39,35 (11), 42,01 (12), 44,48 (13), 48,25 (14), 51,43 (15), 55,32 (16), 58,88 (17), 64,51 (18), 61,67 (19) %.

Параметры уравнений (4)

Таблица 1

Концентрация LiBr, масс. %	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	СКО·10 ³
2,00	0,63390	0,368972	-0,128004	0,0148555	0	1,07
3,73	0,93976	0,010759	0,006467	-0,0017529	0	0,95
5,53	0,68726	0,259044	-0,075537	0,0071558	0	0,78
7,68	-0,06899	1,545992	-0,877722	0,222660	-0,021192	0,91
11,09	-0,64563	2,337048	-1,293661	0,319590	-0,029644	1,50
15,68	-0,22264	1,575875	-0,812578	0,189330	-0,016886	1,20
21,17	-0,95411	2,710291	-1,479447	0,360327	-0,033066	1,10
26,65	-0,96422	2,665636	-1,432995	0,343029	-0,030987	1,00
31,09	0,22044	0,893275	-0,454554	0,104555	-0,009426	1,50
35,48	0,15829	1,089428	-0,611323	0,150233	-0,013977	1,30
39,35	-0,11978	1,496963	-0,833092	0,202414	-0,018553	1,30
42,01	-1,13964	2,980853	-1,623117	0,384071	-0,033837	0,99
44,01	-1,14136	2,984403	-1,622967	0,382324	-0,033487	1,30
48,14	-1,48881	3,376237	-1,772153	0,402786	-0,034063	1,30
51,43	-1,83519	3,829012	-1,990122	0,448291	-0,037567	1,30
55,32	-2,52595	4,911547	-2,614542	0,605104	-0,052091	1,20
58,88	-0,69061	2,218266	-1,147358	0,252693	-0,020614	0,97
64,51	-2,48394	5,077509	-2,834182	0,687849	-0,062103	0,67
60,64	0,99467	-0,069287	0	0	0	1,08

Для расчета концентраций и удельной теплоемкости $C_p(T, m)$ растворов необходимы достаточно точные данные о плотности. Для температур выше 130 °С таблицы плотности для растворов бромида лития в настоящее время отсутствуют. Нами был проведен анализ и обработка имеющихся в литературе данных о плотности с целью расширения температурного интервала существующих таблиц. При этом были учтены результаты работ [13–17], в том числе содержащие экспериментальные значения плотности для 150 [13] и 200 °С [14]. По данным о плотности были рассчитаны кажущиеся молярные объемы Ψ_v , более чувствительные к погрешностям в плотности. Температурные и концентрационные зависимости $\Psi_v(T, m)$ были аппроксимированы (сглажены) уравнениями, имеющими эмпирическое обоснование (см., напр., [15]). С помощью полученных значений по $\Psi_v(T, m)$ и соотношению

$$\rho(T, m) = \rho_0(T) (1 + m M_s) / [1 + m \rho_0(T) \Psi_v(T, m)], \quad (5)$$

где m — моляльность, M_s — молекулярная масса соли, рассчитана табл. 2 плотности водных растворов бромида лития до 200 °С и массовой концентрации до 65 %. В диапазоне до 40 масс. % и 100 °С полученные значения плотности практически не отличаются от данных таблиц из работы [5]. При максимальных параметрах (200 °С и 65 масс. %), по нашей оценке, погрешности могут составлять 0,5 ÷ 0,7 %.

В табл. 3 приведены значения удельной изобарной теплоемкости водных растворов бромида лития, рассчитанные по экспериментально найденным значениям для объемной теплоемкости, полученным результатам о плотности этих растворов и данным о свойствах воды [11, 12]. Погрешность значений, приведенных в табл. 3, до 150 °С не превышает 0,3 ÷ 0,4 %, при максимальных температурах и концентрациях может увеличиваться до 0,7 ÷ 1 % из-за недостаточной точности значений плотности. Следует отметить, что в приведенных оценках не учтена погрешность таблиц теплоемкости воды.

Таблица 2

Плотность водных растворов бромида лития, кг/м³

Температура, °С	Концентрация LiBr, масс. %							
	0	10	20	30	40	50	60	65
0	999,7	1078,0	1166,7	1269,5	1391,5	1541,2	–	–
10	999,9	1077,0	1164,7	1266,7	1388,0	1536,9	–	–
20	998,5	1074,7	1161,6	1262,9	1383,6	1531,6	1720,0	–
25	997,2	1073,2	1159,8	1260,7	1381,1	1528,8	1716,5	–
30	995,8	1071,5	1157,8	1258,5	1378,6	1525,9	1712,8	1826,6
40	992,2	1067,6	1153,6	1253,9	1373,4	1520,0	1705,7	1817,9
50	987,9	1063,2	1149,0	1249,0	1368,1	1514,2	1698,7	1809,5
60	983,0	1058,3	1144,1	1243,9	1362,7	1508,3	1691,8	1801,6
70	977,6	1052,9	1138,7	1236,5	1357,3	1502,4	1685,1	1794,1
80	971,7	1047,1	1133,0	1232,9	1351,6	1496,5	1678,4	1786,8
90	965,3	1040,9	1126,9	1227,0	1345,8	1490,6	1671,7	1779,7
100	958,4	1034,2	1120,4	1220,7	1339,8	1484,5	1665,1	1772,6
110	951,0	1027,1	1113,5	1214,0	1333,4	1478,2	1658,3	1765,3
120	943,2	1018,9	1104,9	1205,1	1324,1	1468,7	1648,8	1755,8
130	934,9	1011,9	1098,7	1199,9	1320,0	1464,7	1643,3	1751,7
140	926,1	1003,9	1090,9	1192,6	1313,3	1458,1	1636,3	1746,5
150	916,9	995,8	1082,8	1184,8	1305,6	1449,7	1626,6	1737,9
175	892,2	975,3	1062,7	1165,3	1286,7	1428,1	1599,7	1720,9
200	865,2	955,9	1043,7	1146,7	1267,7	1403,1	1566,1	1705,0

Таблица 3

Изобарная теплоемкость растворов бромида лития, кДж·кг⁻¹·К⁻¹

Концентрация LiBr, моль/кг	Температура, °С									
	0	10	20	25	30	40	50	60	70	80
0,235	4,146	4,109	4,091	4,088	4,083	4,081	4,081	4,084	4,087	4,093
0,446	4,019	4,002	3,997	3,996	3,997	3,999	4,001	4,004	4,007	4,011
0,674	3,943	3,925	3,920	3,920	3,920	3,923	3,927	3,931	3,934	3,938
0,958	3,790	3,806	3,818	3,822	3,826	3,831	3,834	3,835	3,836	3,837
1,436	3,598	3,623	3,640	3,647	3,652	3,659	3,662	3,664	3,666	3,667
2,141	3,414	3,430	3,446	3,453	3,459	3,469	3,477	3,484	3,488	3,493
3,092	3,150	3,185	3,210	3,219	3,227	3,238	3,246	3,250	3,254	3,256
4,184	2,918	2,950	2,975	2,985	2,993	3,006	3,015	3,022	3,027	3,031
5,196	2,747	2,770	2,790	2,800	2,809	2,824	2,837	2,846	2,854	2,860
6,332	2,573	2,597	2,619	2,628	2,637	2,652	2,664	2,673	2,681	2,688
7,471	2,420	2,449	2,474	2,486	2,496	2,513	2,527	2,539	2,548	2,556
8,342	2,334	2,361	2,383	2,392	2,401	2,416	2,428	2,439	2,450	2,459
9,051	2,261	2,286	2,307	2,317	2,326	2,341	2,355	2,367	2,378	2,389
10,689	2,162	2,180	2,198	2,206	2,214	2,230	2,244	2,257	2,270	2,282
12,193	2,040	2,062	2,083	2,093	2,102	2,121	2,137	2,153	2,168	2,182
14,257	1,923	1,953	1,978	1,989	1,998	2,016	2,032	2,047	2,061	2,074
16,492	–	–	1,881	1,890	1,899	1,917	1,934	1,949	1,964	1,977
18,472	–	–	–	–	1,824	1,843	1,860	1,876	1,890	1,902
20,931	–	–	–	–	1,747	1,767	1,784	1,799	1,811	1,823
	90	100	110	120	130	140	150	160	180	200
0,235	4,099	4,108	4,118	4,130	4,144	4,161	4,180	4,201	4,249	4,304
0,446	4,015	4,022	4,030	4,040	4,052	4,067	4,084	4,103	4,146	4,195
0,674	3,943	3,948	3,955	3,964	3,974	3,986	3,999	4,015	4,049	4,087
0,958	3,839	3,843	3,849	3,857	3,868	3,881	3,896	3,913	3,951	3,992
1,436	3,670	3,674	3,68	3,687	3,697	3,707	3,720	3,733	3,760	3,786
2,141	3,497	3,502	3,508	3,515	3,522	3,531	3,540	3,550	3,569	3,585
3,092	3,259	3,263	3,267	3,273	3,279	3,287	3,295	3,304	3,320	3,333
4,184	3,035	3,039	3,044	3,049	3,056	3,063	3,071	3,079	3,098	3,116
5,195	2,865	2,870	2,876	2,880	2,886	2,893	2,901	2,909	2,926	2,944
6,332	2,694	2,701	2,708	2,715	2,723	2,732	2,741	2,751	2,770	2,787
7,471	2,564	2,571	2,578	2,586	2,594	2,604	2,614	2,625	2,650	2,680
8,342	2,469	2,478	2,488	2,499	2,509	2,521	2,532	2,544	2,512	2,590
9,051	2,399	2,410	2,420	2,431	2,443	2,455	2,468	2,482	2,400	2,547
10,689	2,294	2,305	2,317	2,328	2,339	2,351	2,363	2,375	2,291	2,428
12,193	2,195	2,207	2,219	2,230	2,241	2,252	2,262	2,272	2,184	2,310
14,257	2,087	2,099	2,111	2,123	2,134	2,145	2,156	2,166	2,095	2,202
16,492	1,990	2,002	2,013	2,024	2,036	2,047	2,058	2,070	2,018	2,124
18,472	1,913	1,924	1,934	1,945	–	–	–	–	–	–
20,931	1,834	1,844	1,855	1,866	1,877	1,887	1,898	1,909	1,932	1,955

На рис. 3 показано сопоставление наших результатов с данными других авторов на изотермах 25, 100, 150 и 200 °С. Как видно, наши результаты при 25 °С и концентрациях до 60 масс. % хорошо (в пределах 0,5 %) согласуются с [18, 20]. Несколько большие расхождения наблюдаются с работами [19, 21], однако и они не превышают 1 %. При 100 °С расхождения между результатами большинства авторов лежат в пределах ± 1 %, за исключением работ [1] и [21], в которых при

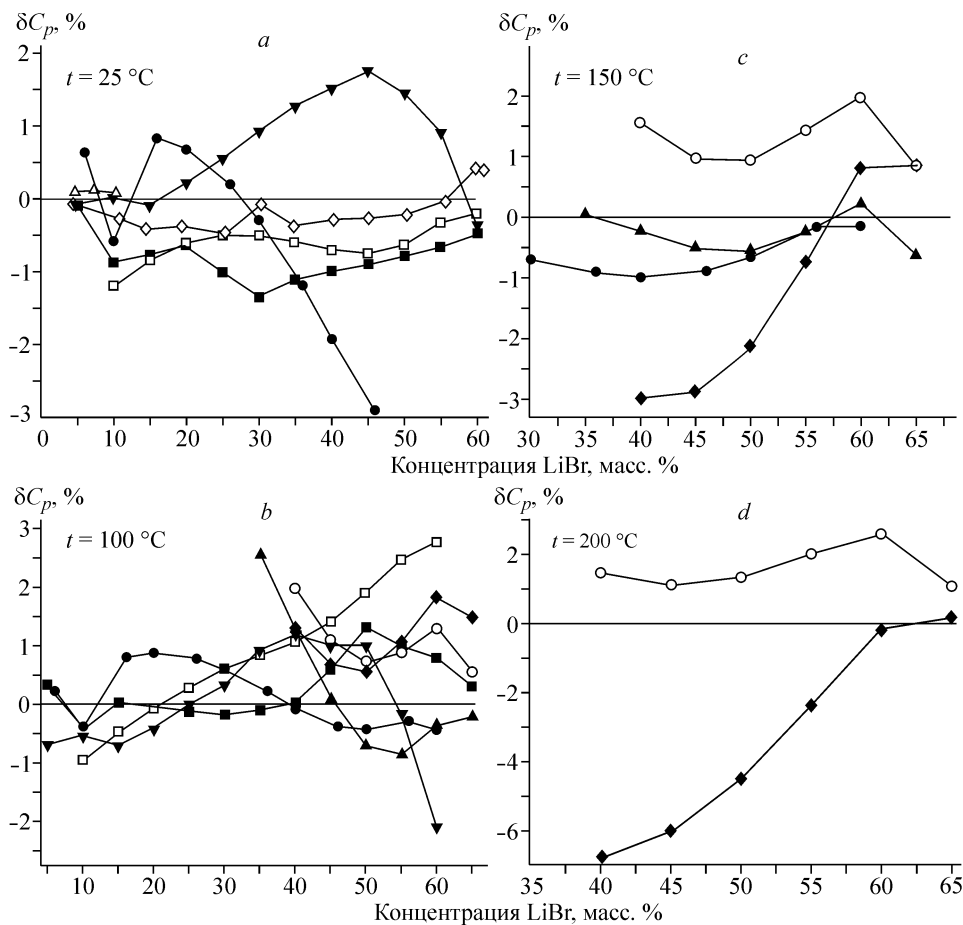


Рис. 3. Сопоставление данных о теплоемкости водных растворов LiBr по литературным ссылкам.

● — [6], ■ — [19], Δ — [18], ◇ — [20], — — [1], □ — [21], ○ — Rockenfeller [7], ◆ — Jetter [7], _ — Feueracker [7].

60 масс. % значения теплоемкости отличаются более чем на 2 %. Следует отметить, однако, что в отклонениях данных других работ от настоящей трудно проследить какую-либо закономерность. На изотерме 150 °C данные в пределах 0,6 % согласуются с результатами измерений Feueracker'a, а при 200 °C лежат систематически ниже на 1,5 – 2 % данных Rockenfeller'a. Значения теплоемкости, рассчитанные по уравнению Jetter'a, заметно отличаются от результатов других работ. (Три последних автора цитируются по обзору [7].)

На основе приведенного сопоставления можно сделать вывод, что полученные в нашей работе экспериментальные данные о теплоемкости водных растворов бромид лития позволяют составить достаточно точные (с погрешностью порядка 1 %) таблицы всех калорических свойств этих растворов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lower H. Thermodynamische und physikalische Eigenschaften der wässrigen Lithium-Bromid Lösung: Diss. Karlsruhe, 1960.
2. Усюкин И.П. Термодинамические диаграммы раствора бромистый литий — вода // Холодильн. техн. — 1969. — № 1. — С. 25.

3. **Mc Neely L.A.** Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide // ASHRAE Transactions. — 1979. — Vol. 85, Pt 1. — P. 413–434.
4. **Верба О.И., Груздев В.А., Захаренко Л.Г. и др.** Термодинамические свойства водных растворов бромистого лития // Холодильн. техн. — 1986. — № 3. — С. 44–49.
5. **Gmelins** Handbuch der Anorganische Chemie, 8 Aufgabe, Bd. Lithium-System Number 20. — Weinheim: Verlag Chemie, 1960. — 525 s.
6. **Физико-химические** свойства бинарных и многокомпонентных растворов неорганических веществ: Справочник / И.Д. Зайцев, Г.Г. Асеев. — М.: Химия, 1988. — 416 с.
7. **Kaita Y.** Thermodynamic properties of lithium bromide-water solutions at high temperatures // Intern. J. Refrigeration. — 2001. — Vol. 24. — P. 374–390.
8. **Олейник Б.Н.** Точная калориметрия. — М.: Изд-во стандартов. 1973. — 208 с.
9. **Груздев В.А., Серяков А.В.** Жидкостный калориметр // Теплофизические свойства веществ: Труды VIII Всесоюз. конф. Ч.1. — Новосибирск, 1989. — С. 251–261.
10. **Серяков А.В.** Автоматизированный калориметр постоянного объема для исследования растворов электролитов // Теплофизические свойства растворов, расплавов и композитов: Сб. научн. тр. — Новосибирск, 1991. — С. 139–153.
11. **Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. — М.: Изд-во стандартов, 1969. — 408 с.
12. **Александров А.А., Трахтенгерц М.С.** Теплофизические свойства воды при атмосферном давлении. — М.: Изд-во стандартов, 1977. — 99 с.
13. **Колотов Я.Л., Басин А.С.** Экспериментальное исследование плотности водных растворов бромистого лития при повышенных температурах // Исслед. теплофиз. свойств растворов и расплавов. — Новосибирск, 1974. — С. 5–20.
14. **Федоров М.К., Зарембо В.И.** Объемные свойства водных растворов галогенидов щелочных металлов при высоких параметрах состояния. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 24 с.
15. **Барон Н.М.** Зависимость кажущегося молярного объема некоторых солей от концентрации и температуры // Работы в области физической и коллоидной химии: Тр. ЛТХИ им. Ленсовета. Вып. 37. — Л.: Госхимиздат. — 1957. — С. 19–29.
16. **Машовец В.П., Барон Н.М., Щерба М.У.** Вязкость и плотность водных растворов LiCl, LiBr и LiI при низких и средних температурах // Журн. прикл. химии. — 1971, № 9. — С. 1981–1986.
17. **Joly R.D., Perachon G.** Contribution a la connaissance de la structure des solutions (systemes ternaires halogenure alcalin-eau-acide halogene correspondant) // Thermochemica Acta. — 1977. — Vol. 21. — P. 333–347.
18. **Eigen M., Wicke E.** Ionenhydratation und spezifische Wärme wässriger Elektrolytlosungen // Zeitschr. Fur Elektrochemie und Angewandte Physikalische Chemie. — 1951. — B. 55, N. 5. — P. 354–363.
19. **Лавров В.А.** Исследование теплоемкости водных растворов бромистого лития на автоматизированном калориметре // Теплофиз. свойства веществ и материалов: Сб. научн. тр. — Новосибирск, 1979. — С. 81–89.
20. **Lange E., Schwartz E.** Lösungs- und Verdünnungswärmen von der äussersten Verdünnung bis zur Sättigung. 4. Lithium bromid // Z. Phys. Chemie. — 1928. — Bd. 133, H. 1/2. — S. 129–150.
21. **Ogawa K.** Thermodynamic properties of aqueous solution of lithium bromide. 1. Measurement of specific heat at atmospheric pressure // Refrigeration (Japan). — 1980. — Vol. 50, No. 630. — P. 347–351.

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2004 г.