ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2001, том 39, № 4, с. 674–678

УДК 531.87:546.33'36

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ ЖИДКИХ СПЛАВОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ. СИСТЕМА Na–Cs

© 2001 г. Э. Э. Шпильрайн, А. М. Белова, В. И. Шкермонтов, А. Г. Мозговой, С. Н. Сковородько

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Поступило в редакцию 27.12.2000 г.

В работе [1] приведены результаты измерений давления насыщения расплавленных натрий-калиевых сплавов пяти составов (33.3, 50.0, 66.6, 68.0 и 80.0 ат. % K) в температурном интервале 750–1300 K. В продолжение этих исследований изучена p_s–T_s-зависимость нескольких жидких натрий-цезиевых сплавов при высоких температурах.

Измерения выполнялись на опытной установке, созданной по методу U-образного манометра и детально описанной в [2]. Исследованные сплавы поставлялись в готовом виде в запаянных под вакуумом стеклянных ампулах емкостью ~50 см^3 Институтом химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН (г. Апатиты Мурманской обл.). Чистота исходных натрия и цезия составляла около 99.99 мас. % каждого щелочного металла, а общее содержание металлических и газовых примесей в приготовленных сплавах Na–Cs не превышало 1.5×10^{-2} мас. %.

Химический состав натрий-цезиевых сплавов приведен в табл. 1. Погрешность его определения по данным фирмы-поставщика равнялась ±0.1 мас. %. Как показали измерения [1], химический состав сплавов щелочных металлов в процессе проведения экспериментов практически не меняется.

Результаты исследований сведены в табл. 2, где рабочая температура указана по Международной практической температурной шкале 1968 г. При переводе значений температуры, выраженной в градусах Цельсия, в Кельвины принималось, что 0°C = 273.2 K.

Доверительная погрешность экспериментов, объединяющая систематическую и случайную составляющие, рассчитывалась по методике [3] и оказалась равной 1.5% при температурах до 1000 K и 1.0% при более высоких температурах. Вклады обеих составляющих примерно одинаковы во всем исследованном интервале температур.

Полученные опытные данные по давлению насыщенных паров жидких сплавов Na–Cs обрабатывались при помощи метода наименьших квадратов и аппроксимировались выражением

$$\ln p_s = A + \frac{B}{\tau} + C\ln\tau + D\tau + \ldots, \qquad (1)$$

где p_s – давление насыщения сплава в МПа; $\tau = T/1000$; T – температура расплава в K.

Статистический анализ результатов этой обработки показал, что оптимальное число параметров аппроксимирующего уравнения (1) для всех исследованных натрий-цезиевых сплавов равно трем. Их значения приведены в табл. 3.

Отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующего уравнения (1) представлено на рис. 1. Его среднее квадратичное значение составляло 0.4% для сплавов № 1, 3 и 5 и 0.6% для сплавов № 2, 4 и 6.

Давление насыщения натрий-цезиевых сплавов с указанными в табл. 1 составами измерено впервые. Из литературы известна лишь одна экспериментальная работа подобного рода [4], в которой исследовалось давление насыщенных паров сплавов Na–Cs со следующим содержанием цезия: 0.6, 2.3, 7.6 и 55.5 ат. % в температурном диапазоне 540–1000 K.

Таблица 1. Состав исследуемых сплавов Na-Cs

Номер сплава		1	2*	3	4	5**	6
Содержание цезия	ат. %	20.0	33.3	45.0	65.0	75.0	85.0
	мас. %	59.1	74.3	82.5	91.5	94.5	97.0

*, ** Перитектический и эвтектический сплав соответственно.

Таблица 2. Опытные данные о давлении насыщенных паров сплавов Na–Cs

№ п/п	T, K	p_s, МПа	№ п/п	T, K	p_s, МПа	№ п/п	T, K	p_s, МПа
				сплав № 1				
1	796.7	0.0069	12	1008.8	0.0711	22	1147.3	0.2156
2	825.4	0.0101	13	1012.1	0.0729	23	1148.6	0.2170
3	828.8	0.0105	14	1042.1	0.0950	24	1149.0	0.2178
4	829.0	0.0106	15	1042.1	0.0950	25	1175.2	0.2614
5	876.8	0.0187	16	1089.7	0.1394	26	1175.5	0.2623
6	878.4	0.0191	17	1090.2	0.1398	27	1211.7	0.3336
7	919.4	0.0298	18	1090.4	0.1407	28	1212.9	0.3357
8	954.2	0.0426	19	1101.6	0.1534	29	1213.2	0.3365
9	954.5	0.0428	20	1101.7	0.1539	30	1245.0	0.4120
10	979.9	0.0549	21	1119.0	0.1750	31	1245.3	0.4130
11	980.3	0.0551						
				сплав № 2				
1	776.8	0.0066	9	927.5	0.0400	17	1088.9	0.1670
2	820.3	0.0117	10	927.6	0.0398	18	1095.5	0.1762
3	821.0	0.0119	11	927.8	0.0406	19	1206.5	0.3813
4	821.6	0.0120	12	927.8	0.0409	20	1228.0	0.4399
5	864.7	0.0200	13	972.7	0.0628	21	1228.4	0.4416
6	865.3	0.0204	14	1002.0	0.0816	22	1251.2	0.5065
7	898.4	0.0294	15	1056.9	0.1308	23	1251.5	0.5073
8	899.0	0.0296	16	1088.5	0.1669			
				сплав № 3				
1	782.4	0.0091	12	976.4	0.0822	22	1121.5	0.2636
2	783.2	0.0092	13	976.6	0.0823	23	1148.4	0.3170
3	825.3	0.0159	14	977.1	0.0828	24	1149.1	0.3180
4	825.6	0.0161	15	1009.2	0.1104	25	1187.8	0.4099
5	867.5	0.0267	16	1009.8	0.1111	26	1188.4	0.4118
6	873.9	0.0285	17	1050.8	0.1555	27	1188.7	0.4126
7	874.3	0.0287	18	1051.0	0.1556	28	1219.3	0.4981
8	875.6	0.0292	19	1080.6	0.1959	29	1219.4	0.4984
9	918.5	0.0466	20	1119.8	0.2613	30	1250.7	0.5990
10	920.1	0.0475	21	1121.3	0.2635	31	1251.4	0.6009
11	951.7	0.0657						
				сплав № 4				
1	777.0	0.0101	12	996.9	0.1154	23	1138.4	0.3407
2	801.7	0.0143	13	1027.0	0.1489	24	1169.6	0.4209
3	811.6	0.0162	14	1042.4	0.1685	25	1170.2	0.4219
4	818.6	0.0175	15	1044.5	0.1710	26	1205.4	0.5274
5	820.3	0.0181	16	1084.4	0.2329	27	1205.8	0.5294
6	820.5	0.0183	17	1084.6	0.2329	28	1233.8	0.6262
7	845.2	0.0246	18	1121.0	0.3015	29	1234.3	0.6281
8	877.8	0.0360	19	1121.4	0.3025	30	1258.9	0.7194
9	910.0	0.0510	20	1121.7	0.3036	31	1259.4	0.7208
10	911.0	0.0514	21	1137.2	0.3389	32	1259.5	0.7231
11	950.0	0.0758	22	1137.8	0.3396	33	1259.7	0.7254

Таблица 2. Окончание

№ п/п	T, K	p_s, МПа	№ п/п	T, K	p_s, МПа	№ п/п	T, K	p_s, МПа
				сплав № 5				
1	760.3	0.0090	13	896.2	0.0508	25	1082.3	0.2619
2	765.9	0.0098	14	897.0	0.0510	26	1084.4	0.2663
3	793.6	0.0146	15	897.0	0.0512	27	1084.4	0.2663
4	793.7	0.0146	16	934.5	0.0749	28	1084.5	0.2653
5	812.3	0.0186	17	935.5	0.0758	29	1109.0	0.3165
6	816.3	0.0197	18	975.0	0.1098	30	1109.2	0.3170
7	846.1	0.0285	19	977.7	0.1112	31	1139.3	0.3901
8	848.8	0.0294	20	1008.7	0.1462	32	1139.7	0.3914
9	859.3	0.0334	21	1008.7	0.1466	33	1158.6	0.4974
10	859.8	0.0336	22	1058.1	0.2181	34	1194.9	0.5480
11	888.3	0.0462	23	1058.4	0.2186	35	1212.8	0.6176
12	890.9	0.0475	24	1058.4	0.2193			
				сплав № 6				
1	771.8	0.0117	14	905.0	0.0593	27	1103.9	0.3266
2	773.0	0.0118	15	905.3	0.0597	28	1142.4	0.4189
3	785.7	0.0141	16	905.9	0.0599	29	1166.0	0.4878
4	786.1	0.0142	17	939.2	0.0839	30	1166.7	0.4879
5	787.0	0.0143	18	967.8	0.1094	31	1167.1	0.4900
6	802.7	0.0176	19	968.8	0.1109	32	1167.1	0.4899
7	803.1	0.0179	20	997.4	0.1420	33	1204.2	0.6206
8	803.4	0.0179	21	998.2	0.1426	34	1221.8	0.6881
9	803.9	0.0181	22	1022.4	0.1745	35	1222.5	0.6909
10	835.7	0.0270	23	1045.2	0.2108	36	1222.6	0.6908
11	836.7	0.0274	24	1072.8	0.2599	37	1257.8	0.8412
12	871.9	0.0413	25	1073.0	0.2603			
13	872.3	0.0416	26	1103.8	0.3257			

Концентрационная и температурная зависимости отклонений рассчитанных по уравнению (1) значений давления насыщения исследованных натрий-цезиевых сплавов от закона Рауля приведены на рис. 2 и 3 соответственно. Закон Рауля принимался в наиболее простом виде:

$$p_s = p_{s1}x_1 + p_{s2}x_2, \qquad (2)$$

Таблица 3. Коэффициенты аппроксимирующего уравнения (1)

Номер сплава*	A	B	C
1	4.0979	−6.8200	2.2532
2	4.4005	−6.9239	2.0217
3	5.8555	−8.1428	0.6346
4	5.4749	−7.6094	1.0519
5	6.6443	−8.6368	0.0419
6	6.2561	−8.1900	0.3586

* Номер сплава указан в соответствии с табл. 1.

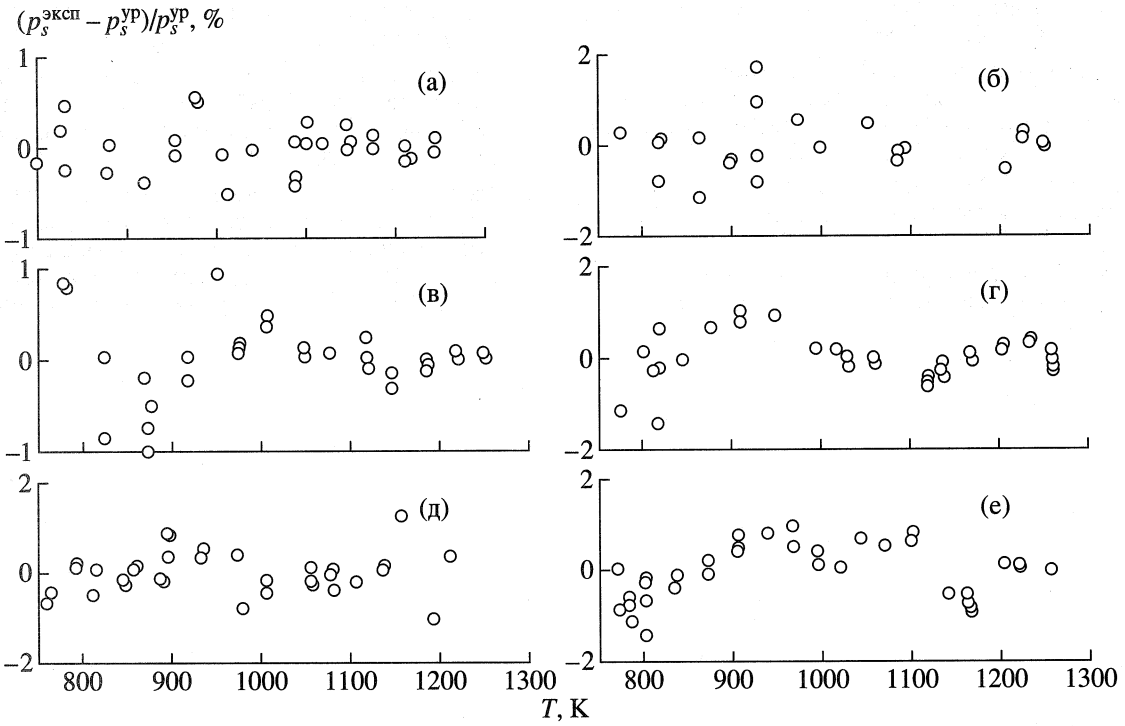

Рис. 1. Отклонение опытных данных по давлению насыщенных паров жидких натрий-цезиевых сплавов от аппроксимирующего уравнения (1): а – сплав № 1, б – № 2, в – № 3, г – № 4, д – № 5, е – № 6.

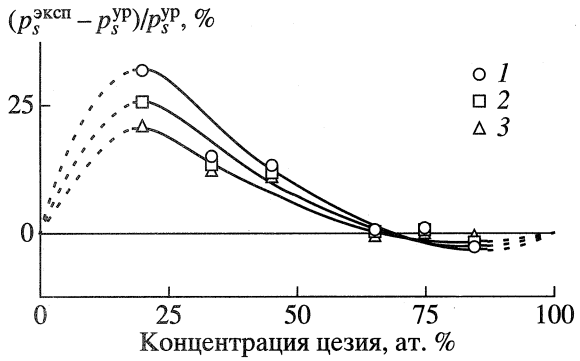

Рис. 2. Концентрационная зависимость отклонения экспериментальных данных по давлению насыщения сплавов Na–Cs от уравнения (2): *1* – температура 1000, *2* – 1100, *3* – 1200 K.

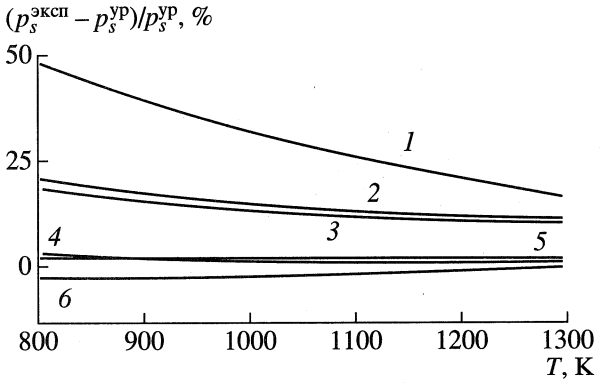

Рис. 3. Температурная зависимость отклонения опытных данных по давлению насыщенных паров натрий-цезиевых сплавов от уравнения (2): *1* – сплав № 1, *2* – № 2, *3* – № 3, *4* – № 4, *5* – № 5, *6* – № 6.

где p_{s1}, p_{s2} – давление насыщенных паров чистого первого и второго компонентов сплава соответственно (для натрия и цезия оно бралось по рекомендуемым справочным данным [5 или 6]); x_1, x_2 – мольная концентрация первого и второго компонента в сплаве, причем $x_1 + x_2 = 1$.

Как видно из рис. 2, 3, характер этих отклонений не изменился по сравнению с натрий-калиевыми сплавами [1]. Однако абсолютные значения полученных отклонений от закона Рауля оказались примерно на порядок выше. Это может быть объяснено тем фактом, что отличие мольных объемов компонентов сплава Na–Cs намного больше, чем в случае сплава Na–K.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шпильрайн Э.Э., Белова А.М., Шкермонтов В.И. и др.* Экспериментальное исследование давления насыщенных паров жидких сплавов щелочных ме-

таллов при высоких температурах. Система Na–K // ТВТ. 2001. Т. 39. № 4. С. 552.

2. *Шпильрайн Э.Э., Белова А.М., Шкермонтов В.И., Мозговой А.Г.* Экспериментальное исследование давления насыщенного пара калия при температурах 770–1160 К // ТВТ. 1980. Т. 18. № 2. С. 290.
3. *Рабинович С.Г.* Методика вычисления погрешности результата измерения // Метрология. 1970. № 1. С. 3.
4. *Ермилов Б.И., Каландаришвили А.Г., Михеев В.К.* Экспериментальное исследование давления насыщенных паров бинарных систем щелочных металлов // ТВТ. 1990. Т. 28. № 3. С. 599.
5. *Мозговой А.Г., Новиков И.И., Покрасин М.А. и др.* Давление насыщенных паров щелочных металлов. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 1. М.: ИВТАН, 1985.
6. *Мозговой А.Г., Рощупкин В.В., Покрасин М.А. и др.* Литий, натрий, калий, рубидий, цезий. Давление насыщенных паров при высоких температурах. Таблицы стандартных справочных данных. ГСССД 112-87. М.: Изд-во стандартов, 1987.