

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. И. Чернеева, В. Н. Проскурин, Экспериментальное исследование давления насыщенного пара рубидия и цезия,
ТВТ, 1972, том 10, выпуск 4, 765–770

<https://www.mathnet.ru/tvt9725>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.173

27 апреля 2025 г., 09:22:12



УДК 536.423.15

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННОГО ПАРА РУБИДИЯ И ЦЕЗИЯ

Л. И. Чериева, В. Н. Проскури

Выполнено измерение давления насыщенного пара рубидия в области 683—1649° С и 0,97—101,5 атм и цезия в области 755—1600° С и 2,14—80,5 атм. Точность определения давления насыщенного пара составляет 1,3—0,8%. Обнаружено, что кривые давления насыщения рубидия и цезия пересекаются при 1160° С и 21,48 атм.

В настоящее время давление насыщенного пара рубидия в области выше нормальной точки кипения (НТК) изучено в меньшей степени, чем у остальных щелочных металлов. Известные экспериментальные исследования выполнены в основном до температур не выше 1000° С [1—4] и в [5] до 1080° С. В противоположность рубидию давление насыщенного пара цезия в области от НТК до ~ 1100° С в настоящее время исследовано достаточно подробно благодаря большому количеству экспериментальных работ, выполненных различными методами: [2, 3, 4, 6, 7] — до температур не выше 950° С, [5, 8, 9] — до температур 1030—1080° С и [10] — до температуры 1285° С.

В работе [11] расчетно-теоретическим путем определено давление насыщенного пара рубидия и цезия до 1230° С.

Задачей данной работы являлось экспериментальное исследование давления насыщенного пара рубидия и цезия в малоизученной области высоких температур. Однако с целью проверки работы экспериментальной установки измерение давления насыщенного пара цезия начато от температуры 755° С.

Метод исследования описан в [12]. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В нижней части столба жидкого металла 1 расположен перевернутый стакан 2, в котором установлен дополнительный стакан 4 с отверстием в боковой стенке. Термопара 3 введена так, что ее чувствительный элемент находится выше отверстия в боковой стенке стакана 4. Сосуд 5 охлаждается сверху и нагревается снизу до кипения исследуемого металла под перевернутым стаканом. При этом насыщенный пар вытесняет жидкость из перевернутого стакана, а из дополнительного стакана она сливается через отверстие в боковой стенке, и термопара оказывается расположенной в насыщенном паре над уровнем жидкого металла, небольшое количество которого остается в дополнительном стакане. Заполнение стаканов насыщенным паром определяется по установлению постоянной температуры в стаканах при постоянном внешнем давлении инертного газа и переменном количестве подводимого к жидкости тепла. Для создания давления использовался аргон и гелий, которые очищались пропусканием через нагретую до 500° С медную стружку и столб жидкого цезия, нагретого до 300° С. Маностатичность обеспечивалась демпферным баллоном емкостью 35 л. Заполнение устройства щелочным металлом производилось при вакууме 10^{-3} мм рт. ст. Количество металла определялось по разности весов стеклянной ампулы с металлом до и после заполнения.

Измерение проводилось следующим образом. При некотором постоянном давлении инертного газа производилось непрерывное нагревание столба жидкого металла снизу до установления постоянной температуры t_s в стаканах, не меняющейся при изменении электрической мощности нагревателя на 10—20%. Величина постоянной температуры t_s принята за температуру отнесения. Давление насыщенного пара в стаканах определялось как сумма измеренного давления инертного газа и гидростатического давления столба жидкого металла.

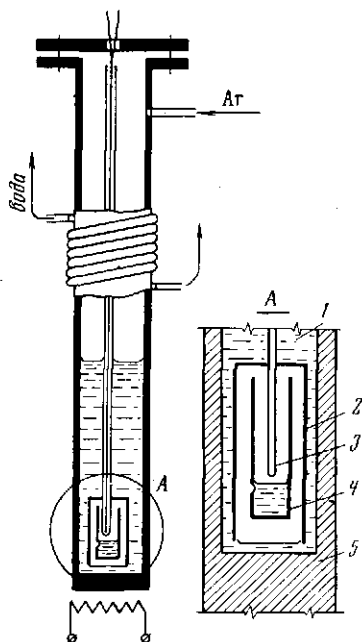


Рис. 1. Измерительная ячейка

Чистота исследованных металлов составляла: рубидий — 99,65%, цезий — 99,99% (по данным ГИРЕДМЕТА). Было проведено пять серий опытов с рубидием в области 683—1649°С и четыре серии опытов с цезием в области 755—1600°С. В третьей серии для рубидия и в первой и второй сериях для цезия измерения проводились в устройстве без дополнительного стакана. Экспериментальные точки приведены в табл. 1 и 2. Температура измерялась образцовыми 2-го разряда платинородий-платиновыми термопарами. Давление инертного газа до 2,7 кгс/см² измерялось ртутным манометром, выше 2,7 кгс/см² — образцовыми пружинными манометрами класса 0,16, которые до и после измерения проверялись при помощи поршневого манометра класса 0,05.

Методом наименьших квадратов определены коэффициенты уравнений

$$\lg p_{\text{Rb}} = 5,25903 - (4035,65 / T) - 0,35387 \lg T,$$

$$\lg p_{\text{Cs}} = 5,71084 - (3904,34 / T) - 0,52605 \lg T,$$

где p — атм, T — °К.

Погрешность измерения температуры принята равной: до 1300°С — $1 \div 1,1$ град, как сумма погрешности образцовых 2-го разряда платинородий-платиновых термопар [13] и погрешности измерения э.д.с. потенциометром ПМС-48; 3,4 град при 1400°С и 3,9 град при 1600°С по допускаемому отклонениям термо-э.д.с. платинородий-платиновых термопар от стандартной градуировки [14]. Относительная погрешность давления насыщенного пара, равная сумме погрешностей манометра, погрешности определения гидростатического давления и погрешности отнесения, не превышает 1,3% при 680—800°С и выше 1300°С и 1% в области 800—1300°С. Разброс экспериментальных точек не превышает 0,8%, что меньше расчетной погрешности определения давления.

Сравнение данных, полученных в устройстве с дополнительным стаканом и без него показало, что отклонения экспериментальных точек имеют одинаковую величину, что позволяет сделать вывод о том, что в пределах указанной выше точности измерений, оба варианта измерительного устройства равноценны. Сравнение кривых $p_s(T)$ рубидия и цезия показало, что эти кривые пересекаются при 1160°С и 21,48 атм: при температурах ниже 1160°С давление насыщенного пара рубидия меньше, чем у цезия, а выше 1160°С — наоборот. К подобному результату приводят и данные Тейпера [5], полученные для этих металлов на одной и той же установке, экспериментальные точки по давлению насыщения рубидия и цезия сходятся при 1070—1080°С.

Давление насыщенного пара рубидия (экспериментальные точки)

t, °C	p, атм	t, °C	p, атм	t, °C	p, атм	t, °C	p, атм
1 серия		1075,4	14,41	1047,9	12,59	1147,7	19,98
		1077,1	14,52	1048,6	12,61	1156,9	20,85
801,1	2,685	1077,5	14,36	1054,5	12,99	1167,7	21,82
808,2	2,863	1082,9	14,94	1062,2	13,51	1177,4	22,78
810,6	2,902	1084,8	15,07	1068,4	13,91	1178,7	22,84
811,4	2,911	1090,4	15,50	1073,5	14,22	1197,4	24,80
811,7	2,917	1092,2	15,62	1079,4	14,65	1214,2	26,48
812,1	2,921	1093,9	15,72	1085,8	15,19	1229,5	28,13
819,3	3,082	1095,2	15,84	1086,2	15,20	1231,0	28,32
826,8	3,260	1095,8	15,93	1092,8	15,74	1240,2	29,42
835,4	3,475	1099,2	16,09	1100,2	16,23	1255,2	31,22
844,8	3,726	1099,8	16,23			1272,5	32,98
852,0	3,920			3 серия		1288,0	34,96
860,6	4,171	2 серия		808,9	2,865	1300,7	36,64
864,7	4,268			819,0	3,097	1315,5	38,71
872,7	4,515	804,2	2,754	827,7	3,320	1330,2	40,49
879,0	4,713	809,8	2,868	836,4	3,509	1336,8	41,25
885,8	4,917	811,1	2,884	843,9	3,693	1346,5	42,82
892,1	5,144	815,3	2,996	850,8	3,887	1365,1	45,74
897,4	5,313	818,0	3,062	857,1	4,078	1372,0	46,28
902,8	5,492	818,6	3,082	861,1	4,203	1378,3	47,46
903,5	5,531	824,3	3,207	868,4	4,400	1391,8	49,44
904,4	5,560	825,4	3,225	876,2	4,632	1394,2	49,99
909,2	5,730	832,8	3,404	884,7	4,913	1406,0	51,84
910,9	5,793	839,5	3,582	893,8	5,232	1415,2	53,23
911,5	5,815	845,7	3,735	902,0	5,484	1417,0	53,84
912,2	5,842	850,2	3,856	908,2	5,771	1426,1	55,07
915,9	6,012	855,2	4,010	915,4	6,049	1432,0	56,32
917,5	6,051	861,2	4,170	920,9	6,236	1446,0	58,51
927,7	6,475	867,7	4,353	930,4	6,577	1450,4	59,32
927,9	6,475	873,7	4,538	942,4	7,056	1469,0	62,55
943,2	7,094	878,9	4,707	952,5	7,536	1469,3	62,90
944,2	7,123	885,8	4,918	960,7	7,930	1483,2	65,47
945,0	7,201	891,3	5,101	978,4	8,707	1484,4	65,39
945,7	7,220	896,3	5,287	989,5	9,265	1497,0	67,90
950,0	7,365	901,0	5,447	999,8	9,820	1510,4	70,65
956,4	7,723	906,1	5,601	1009,8	10,37	1533,5	74,84
965,9	8,111	910,2	5,768	1013,4	10,59	1538,1	75,33
966,1	8,101	914,8	5,945	1085,8	15,12	1550,7	77,39
971,1	8,352	919,2	6,105	1091,6	15,57	1556,4	79,09
978,8	8,730	925,0	6,333	1102,0	16,38	1557,7	79,36
979,1	8,711	933,0	6,657			1563,8	80,68
986,2	9,117	937,2	6,823	4 серия		1575,7	82,91
987,5	9,156	943,9	7,112			1580,8	84,36
987,8	9,117	947,2	7,250	683,2	0,972	1584,7	85,13
995,3	9,524	953,9	7,547	684,5	0,977	1605,7	90,29
995,7	9,582	958,4	7,756	687,7	1,005	1634,0	96,48
997,5	9,601	962,5	7,940	699,9	1,137	1047,9 *	12,59
1000,8	9,862	966,7	8,134	710,5	1,245	1035,7 *	11,76
1000,8	9,814	970,9	8,337	717,0	1,327	1022,7 *	11,03
1004,1	10,06	975,9	8,579	723,0	1,402		
1004,8	9,959	979,0	8,750	732,1	1,521	5 серия	
1016,2	10,63	983,9	9,017	740,0	1,630		
1018,0	10,78	988,8	9,256	746,5	1,723	682,8	0,969
1024,9	11,20	994,8	9,511	753,8	1,834	683,9	0,974
1038,1	12,00	1000,5	9,814	762,5	1,976	686,5	0,995
1048,7	12,66	1005,7	10,12	770,0	2,102	687,9	1,007
1057,9	13,17	1011,1	10,42	1054,5	12,99	707,0	1,208
1064,3	13,56	1014,9	10,62	1068,4	13,91	711,1	1,263
1065,3	13,67	1014,5	10,55	1079,4	14,65	720,3	1,368
1065,8	13,67	1015,1	10,64	1086,2	15,20	728,4	1,473
1066,4	13,75	1022,7	11,03	1100,2	16,23	736,4	1,581
1067,1	13,80	1030,9	11,52	1114,8	17,27	743,9	1,685
1068,6	13,86	1035,7	11,76	1127,7	18,30	750,5	1,782
1074,9	14,39	1042,2	12,19	1135,7	18,94	758,5	1,907

Таблица 1 (продолжение)

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{атм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{атм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{атм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{атм}$
766,5	2,040	1174,0	22,45	1356,2	44,23	1521,3	72,68
1014,5	10,55	1185,9	23,63	1371,8	46,49	1530,2	73,73
1030,9	11,52	1205,1	25,61	1376,0	47,06	1545,5	76,71
1042,2	12,19	1222,2	27,27	1384,1	48,33	1547,1	76,88
1048,6	12,61	1232,2	28,51	1400,0	50,70	1552,9	77,91
1062,2	13,51	1236,9	29,02	1410,7	52,53	1567,2	81,52
1073,5	14,27	1248,5	30,39	1414,9	53,22	1572,0	82,27
1085,8	15,19	1265,0	32,19	1418,8	53,99	1579,4	83,94
1092,8	15,74	1279,7	33,95	1439,0	57,54	1585,0	84,91
1106,6	16,69	1294,0	35,79	1447,4	58,99	1595,9	87,35
1120,8	17,78	1307,7	37,63	1462,0	61,25	1620,1	93,39
1129,5	18,47	1322,4	39,53	1465,0	61,90	1648,9	101,49
1141,3	19,46	1331,0	40,94	1475,6	64,02	1051,3 *	12,77
1152,9	20,46	1331,3	40,77	1478,2	64,26	1038,1 *	12,02
1162,9	21,29	1338,8	41,68	1496,0	67,75	1010,7 *	10,34
1172,5	22,26	1351,3	43,25	1508,0	70,32		

* Проверка воспроизводимости термомпар.

Сравнение полученных данных по давлению насыщенного пара цезия с результатами других работ приведено на рис. 2. Малые расхождения (не более 1%) с наиболее надежными экспериментальными данными [10, 6, 9] свидетельствуют о том, что полученные результаты не содержат значительных систематических ошибок и приведенная погрешность не является завышенной. Расхождения с расчетно-теоретическими данными [11] также не превосходят 1%. Несколько большее расхождение, но не более 2,5%, имеется с данными [5, 3, 8]. Наибольшее отклонение от наших данных имеют данные [2] до 4,5% и [4] до 6%, которые расходятся также и с результатами остальных работ.

Сравнение результатов по давлению насыщения рубидия с данными других работ приведено на рис. 3. Расхождение с данными [1, 2, 5] не

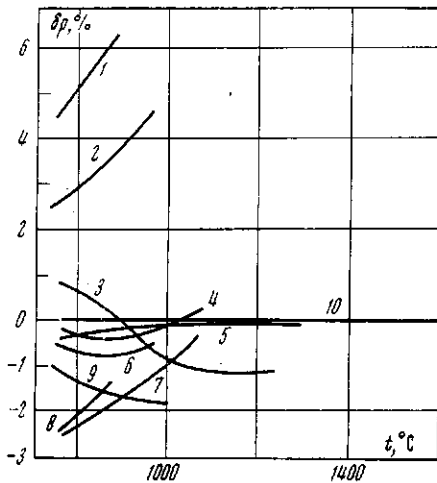


Рис. 2. Сравнение данных по $p_s(T)$ цезия:

1 — [4]; 2 — [2]; 3 — [11]; 4 — [9]; 5 — [10];
6 — [6]; 7 — [5]; 8 — [3]; 9 — [8]; 10 — дан-
ная работа

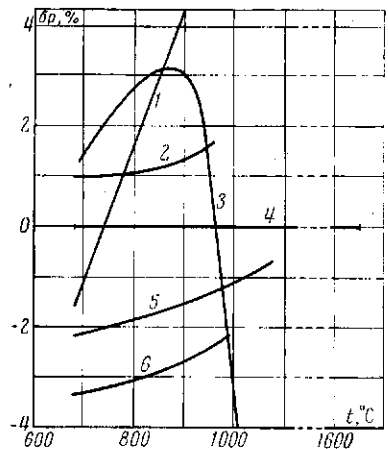


Рис. 3. Сравнение данных по $p_s(T)$ рубидия:

1 — [4]; 2 — [2]; 3 — [11]; 4 — данная ра-
бота; 5 — [5]; 6 — [3]

Давление насыщенного пара цезия (экспериментальные точки)

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{атм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{атм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{атм}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{атм}$
1 серия				3 серия			
		870,1	4,859			1321,2	37,83
		894,5	5,613			1329,5	38,68
862,6	4,646	900,6	5,826	1073,0	14,64	1333,3	39,28
876,9	5,101	1051,4	13,29	1087,9	15,65	1340,5	40,10
890,5	5,507	1071,3	14,55	1098,3	16,40	1343,7	40,47
906,9	6,068	1085,1	15,47	1108,5	17,16	1354,6	41,65
919,8	6,543	1098,4	16,44	1119,7	17,94	1358,5	42,32
932,7	7,085	1109,8	17,32	1129,4	18,72	1367,5	43,35
943,8	7,578	1121,2	18,11	1139,8	19,54	1368,8	43,78
957,5	8,149	1135,2	19,22	1148,2	20,26	1377,8	44,74
968,1	8,643	1150,2	20,37	1157,2	20,98	1391,4	46,59
980,3	9,185	1162,8	21,49	1164,8	21,66	1402,5	48,01
989,4	9,698	1174,5	22,55	1169,7	22,10	1081,3 *	15,21
1000,5	10,21	1185,4	23,52	1175,2	22,66	1073,4 *	14,67
1000,6	10,23	1186,5	23,57	1178,0	22,98		
1009,1	10,71	1194,2	24,34	1179,2	23,00	4 серия	
1019,7	11,28	1203,7	25,18	1186,6	23,61		
1028,5	11,78	1213,0	25,93	1191,4	24,07	1448,3	54,74
1037,2	12,37	1218,8	26,47	1197,0	24,53	1453,1	55,63
1045,8	12,87	1227,3	27,28	1199,9	24,73	1458,6	56,43
1054,2	13,36	1236,0	28,09	1203,2	25,21	1464,5	57,70
1062,7	13,88	1236,0	28,41	1210,5	25,73	1470,8	58,83
1063,4	13,88	1241,8	28,74	1216,7	26,33	1473,7	58,57
1072,0	14,42	1242,9	29,22	1221,8	26,82	1479,2	59,33
1082,5	15,23	1253,1	30,02	1226,8	27,44	1485,8	60,94
1083,2	15,29	1262,3	30,89	1234,9	28,41	1490,1	61,96
		1262,4	31,15	1243,5	29,08	1497,8	63,27
		1263,1	31,41	1250,3	29,86	1504,3	64,12
2 серия		1270,8	32,15	1253,9	30,15	1510,6	65,03
755,1	2,139	1285,2	33,77	1258,2	30,59	1517,2	66,39
768,1	2,362	1312,2	36,99	1260,7	30,83	1524,1	67,43
774,3	2,478	1334,0	39,60	1270,0	31,89	1530,8	68,09
778,9	2,574	1360,5	42,77	1277,4	32,74	1536,9	68,94
791,5	2,845	1385,7	46,19	1278,1	32,77	1541,3	69,61
800,3	3,020	1394,1	46,81	1288,5	33,96	1549,5	70,86
806,8	3,175	1409,4	49,57	1290,1	34,12	1557,9	73,06
822,4	3,542	1411,9	49,64	1293,4	34,50	1564,7	73,87
831,9	3,755	1453,2	55,65	1300,5	35,30	1571,4	74,72
834,4	3,958	1478,6	59,35	1306,3	36,09	1576,5	75,86
844,5	4,133	1499,2	62,25	1309,6	36,46	1583,1	77,62
851,3	4,317	1517,9	65,52	1310,8	36,50	1588,7	78,88
860,2	4,529	903,4 *	5,972	1311,3	36,63	1592,4	79,45
864,6	4,713	902,2 *	5,952	1311,8	36,69	1598,6	80,46
				1319,8	37,64		

* Проверка воспроизводимости термопар.

превышает 2%. Большие расхождения имеются с данными [3] — 3,3% при 680°С и [4] — до 4% при 880°С. Расчетно-теоретические данные [11] в пределах суммарной погрешности расчета и эксперимента согласуются до 1100°С — расхождение не более 5%. При более высоких температурах расхождение с данными [11] составляет более 5%, что может быть вызвано погрешностью значений вириального коэффициента $B_1(T)$, учитывающего неидеальность насыщенного пара, полученных в [11] на основании экспериментальных данных до 1080°С и экстраполированных до 1230°С: при экстраполяции ошибка определения $B_1(T)$ может возрасти из-за недостаточной точности исходных экспериментальных данных.

Энергетический институт
им. Г. М. КржижановскогоПоступила в редакцию
14 III 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Воляк, Ю. К. Виноградов, В. М. Анисимов. Теплофизика высоких температур, 6, 754, 1968.
2. C. F. Bonilla, D. L. Sawhney, M. M. Makansi. Trans. ASM, 55, 877, 1962.
3. P. F. Achener et al. AGN, reports, 8027, 8039, 8069, 8075, 8080, 8082, 8088, 8090, TP-71, 1961—1966 (цитир. по [11]).
4. J. Bohdansky, H. E. Schins. J. Appl. Phys., 36 3683, 1965; J. Appl. Phys., 71, 2, 1967.
5. F. Terper, A. Murchison, D. Zelenak, F. Roelich. MSAR, report ML-TDR-64-42, 1964; ORNL, report 3605, 1964 (цитир. по [11]).
6. Э. Э. Шпильрайн, А. М. Белова. Теплофизика высоких температур, 5, 531, 1967.
7. Л. Д. Воляк, Ю. К. Виноградов, В. М. Анисимов. Теплофизика высоких температур, 6, 545, 1968.
8. И. И. Новиков, В. В. Рощупкин. Изм. техн., № 10, 27, 1967.
9. Э. Э. Шпильрайн, Е. Е. Тоцкий, Ю. В. Кармышин. Тр. МЭИ, Теплофизические свойства веществ, вып. 75, 62, 1970.
10. J. P. Stone, C. T. Ewing, J. R. Spann, E. W. Steinkuller, D. D. Williams, R. R. Miller. J. Chem. Eng. Data, 11, 315, 1966.
11. Э. Э. Шпильрайн, К. А. Якимович, Е. Е. Тоцкий, Д. Л. Тимрот, В. А. Фомин. Теплофизические свойства щелочных металлов. Изд. стандартов, 1970.
12. Л. И. Чернсева, В. Н. Проскурин. Теплофизика высоких температур, 10, № 3, 1972.
13. Приборы для измерения температуры и их поверка. Машгиз, 1955.
14. ГОСТ 3044-61. Термомары. Градуировочные таблицы при температуре свободных концов 0° С.