

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

И. И. Новиков, В. В. Рощупкин, М. М. Ляховицкий, Эффект Джоуля–Томсона в парах цезия, *ТВТ*, 1977, том 15, выпуск 4, 758–766

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

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

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.91

26 января 2025 г., 04:03:00



УДК 536.78.001.5:546.31.001.5

ЭФФЕКТ ДЖОУЛЯ — ТОМСОНА В ПАРАХ ЦЕЗИЯ

И. И. Новиков, В. В. Роцункин, М. М. Ляховицкий

Впервые осуществлены измерения коэффициента Джоуля — Томсона в парах цезия вблизи линии насыщения в диапазонах 768–1234 К и ~ 0 – $7,9 \cdot 10^5$ Па. Описывается методика и ход измерений. Проведена математическая обработка результатов. Получены зависимости коэффициента Джоуля — Томсона от температуры и давления. Осуществлено сопоставление их результатов с величинами, полученными из PVT -данных других исследователей, а также с расчетными данными, имеющимися в литературе.

На установке, описанной в работе [1], осуществлено измерение коэффициента Джоуля — Томсона в парах цезия вблизи линии насыщения в диапазоне 768–1234 К и $0,03 \cdot 10^5$ – $7,9 \cdot 10^5$ Па. Измерения проводились по методу Бенетта и Розбука [2], наилучшим образом отвечающему поставленной задаче и представляющему собой модернизированный вариант интегрального метода измерений эффекта Джоуля — Томсона.

Чистота исследованного авторами цезия, согласно паспорту предприятия-поставщика, составляла 99,95%. Анализ чистоты цезия после измерений не проводился.

Для проверки работоспособности установки проводились измерения на углекислоте в диапазоне 293–856 К вдоль изобары $3,92 \cdot 10^5$ Па [3].

Дросселирование паров цезия осуществлялось от фиксированных начальных параметров P_1 и T_1 к варьируемым конечным P_2 и T_2 , причем температура T_1 на 2–3° превышала температуру насыщения при давлении P_1 . Иными словами, исследовался слабо перегретый пар. Начальное давление P_1 определялось температурой жидкого цезия в испарительной камере, которая поддерживалась постоянной с помощью схемы автоматического регулирования. Величина T_1 определялась температурой стенки пароперегревательного участка.

Конечное давление P_2 является функцией температуры конденсата в конденсационной камере, в ходе измерений оно варьировалось изменением температуры в этой камере.

Расход исследуемого пара через сечение дроссельного сопла выбирался с таким расчетом, чтобы не сказывалось влияние вредных перетечек тепла вдоль дроссельного узла. Предварительно исследовалось влияние расхода на измеряемую величину эффекта Джоуля — Томсона при постоянных величинах P_1 и P_2 . Такие измерения проводились при начальных давлениях $1,67 \cdot 10^5$; $3,04 \cdot 10^5$; $3,90 \cdot 10^5$; $6,47 \cdot 10^5$ Па и соответствующих конечных давлениях $0,22 \cdot 10^5$; $0,29 \cdot 10^5$; $1,27 \cdot 10^5$; $1,67 \cdot 10^5$ Па. С ростом массового расхода пара до 310 г/ч наблюдался также и рост разности $T_1 - T_2$. При расходе > 350 г/ч разность температур $T_1 - T_2$ практически не зависела от расхода пара и соответствовала, следовательно, истинной величине эффекта Джоуля — Томсона. При весовых расходах > 1200 г/ч стабильность процесса дросселирования нарушалась, что приводило к большим разбросам измеряемых величин дроссель-эффекта. Величина рабочего массового расхода выбрана равной ~ 400 г/ч.

Давление измерялось с помощью дифференциальных индуктивных датчиков и образцовых манометров класса 0,16. Абсолютная погрешность, вносимая датчиком давления, составляла 36,0 Па, что пренебрежимо мало по сравнению с погрешностью образцовых манометров.

В связи с тем, что под мембранами датчиков находятся капилляры со столбом жидкого металла, мембраны могут занять нулевое положение только по достижении в соответствующих камерах дроссель-аппарата давления, уравнивающего вес столба жидкого металла. Высота столба металла под датчиком P_1 — 1040 мм, под датчиком P_2 — 640 мм. Вводились специальные поправки на показания датчиков, учитывающие вес столба жидкого металла под каждым из них в зависимости от температуры капилляров, и время, прошедшее с начала дросселирования. Температура капилляров измерялась в трех точках по их длине.

Температура паров до и после дросселирования измерялась с помощью платинородий-платиновых образцовых термомпар первого разряда. Тарировка образцовых термомпар произведена во ВНИИМе. Индивидуальной тарировке по образцовой термомпаре первого разряда были подвергнуты все термомпары, включенные в автоматическую систему адиабатической защиты.

Для проверки работы термомпар после установки их в аппарате, а также системы измерения давления проводились измерения давления насыщенного пара цезия в диапазоне 811—1202 К при полностью закрытом дроссельном сопле автономно в испарительной и конденсационной камерах дроссель-аппарата. Температура жидкого цезия в камерах поддерживалась одинаковой и различалась не более чем на 1 К. Как показал анализ, PT -данные авторов в пределах погрешности измерений хорошо согласуются с данными других исследователей, в частности, с данными [4].

Было исследовано также влияние неадиабатичности на точность измерения T_1 и T_2 в процессе дросселирования. Опыты показали, что при абсолютной погрешности автоматической системы адиабатической защиты, равной 0,5 К, максимальная абсолютная погрешность измерения T_1 и T_2 составляет не более 0,2 К.

Каждая серия измерений начиналась с дросселирования пара от заранее выбранных для данной серии начальных параметров P_1 , T_1 в холодную конденсационную камеру. Температура камеры начинала расти за счет тепла, отдаваемого паром при конденсации, стремясь достигнуть определенной равновесной величины. Для ускорения выхода конденсационной камеры на температурный режим включались ее электронагреватели, и температура камеры задавалась на пульте блока И-102 регулятора ВРТ-3. На практике температура конденсационной камеры первоначально задавалась несколько выше равновесной и выбиралась в некоторой степени произвольно.

Для улучшения условий конденсации и выравнивания температурного поля в объеме конденсата через змеевик конденсационной камеры пропускался охлаждающий углекислый газ.

Выход испарительной и конденсационной камер на необходимые температурные режимы до начала дросселирования (при закрытом дроссельном сопле) продолжался обычно полтора-два часа. Температура охранных электронагревателей адиабатической защиты верхней измерительной камеры поддерживалась на 15—20 К выше заданной температуры конденсационной камеры, а температура охранных электронагревателей и нагревателя пароперегревательного участка на 10—20 К выше заданной температуры испарительной камеры.

После того как устанавливалась заданная температура камер, электронагреватели адиабатической защиты переводились в режим автоматического регулирования, и производилось плавное открытие дроссельного сопла. Степень раскрытия сопла открывалась по лимбу микрометрического винта. Спустя 10—15 мин после открытия дроссельного сопла, прекраща-

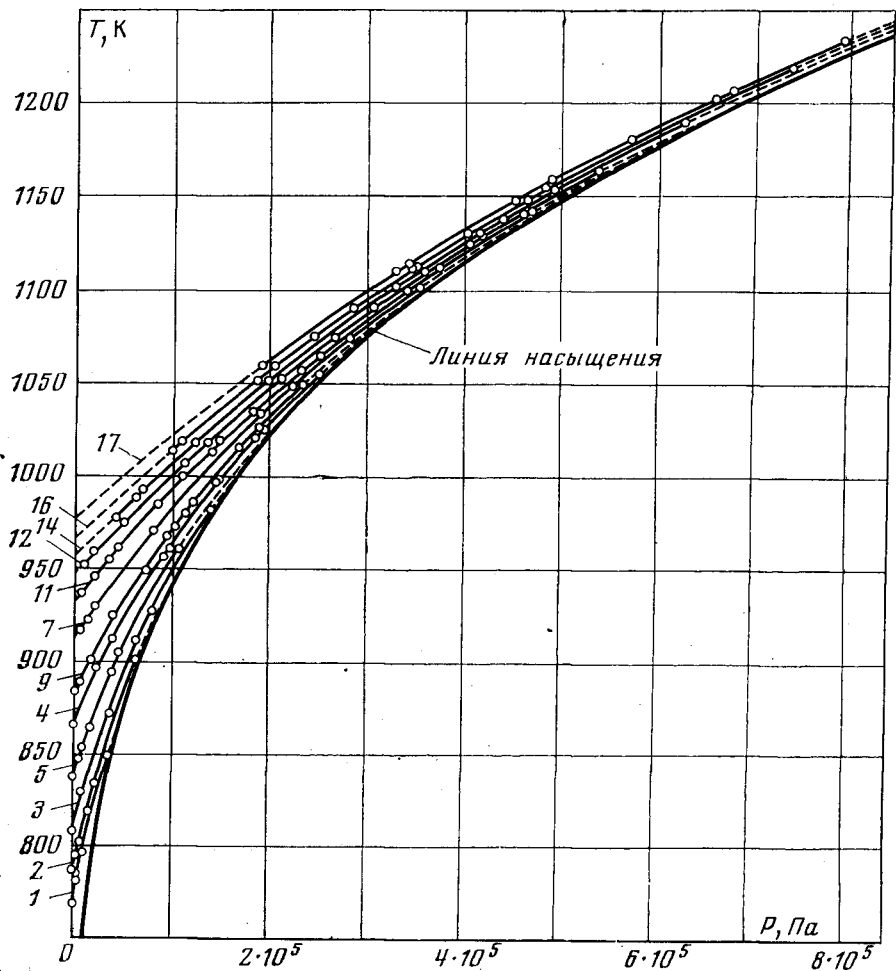


Рис. 1. Некоторые «сглаженные» изоэнтальпы пара цезия и экспериментальные точки

лись колебания всех четырех измеряемых параметров пара, что свидетельствовало о выходе дроссель-аппарата на режим; после этого производились измерения величин P_1 , P_2 , T_1 , T_2 . Затем дроссельное сопло закрывалось. Задавалась более высокая температура конденсационной камеры, а следовательно, устанавливалось и более высокое давление P_2^* . Выход конденсационной камеры на новый температурный режим продолжался от 40 мин до полутора часов в зависимости от величины изменения температуры и от общего температурного уровня. Все это время сопло держалось закрытым. По достижении нового температурного режима конденсационной камеры осуществлялось постепенное открытие сопла. Оно производилось в течение 3–5 мин. Это давало возможность с помощью автоматики следить за изменением режима работы аппарата. Интенсификация процессов испарения и конденсации в соответствующих камерах проходила без сильных колебаний температуры жидкости в них. Практически к моменту полного рабочего раскрытия дроссельного сопла аппарат выходил на режим и по параметрам P_1 , T_1 , P_2' , T_2' .

* Технические особенности дифференциального индуктивного датчика давления P_2 не позволяли использовать его для измерения давления, меньшего $0,11 \cdot 10^5$ Па. Поэтому меньшие давления определялись с помощью PT -данных [4] в соответствии с температурой жидкого цезия в конденсационной камере.

Сводка экспериментальных данных

Номера п/п	Номер изоэнтальпы	Номер точки	$P_1, 10^5 \text{ Па}$	$T_1, \text{ К}$	$P_2, 10^5 \text{ Па}$	$T_2, \text{ К}$
1		1	0,355	846,6	—	—
2		2			0,044 ¹	781,2
3	1	3			0,050 ¹	785,2
4		4			0,100 ¹	796,9
5		1	0,640	900,8	—	—
6		2			0,030 ¹	795,1
7	2	3			0,070 ¹	802,1
8		4			0,160	819,3
9		5			0,230	834,2
10		1	1,402	982,1	—	—
11		2			0,100 ¹	828,9
12	3	3			0,370	871,9
13		4			0,650	910,8
14		5			0,800	927,1
15		1	2,512	1054,9	—	—
16		2			0,229	895,6
17		3			0,396	911,7
18		4			0,919	956,2
19	4	5			0,983	962,0
20		6			1,460	996,6
21		7			1,502	998,0
22		8			1,874	1019,9
23		9			1,950	1025,2
24		1	1,088	960,0	—	—
25	5	2			0,057 ¹	847,5
26		3			0,093 ¹	852,7
27		4			0,176	864,1
28		5			0,414	893,5
29		6			0,500	904,3
30		1	2,203	1075,0	—	—
31		2			0,100 ¹	902,0
32		3			0,440	933,4
33		4			0,560	942,4
34	6	5			0,845	961,9
35		6			0,905	965,8
36		7			1,210	985,1
37		8			1,800	1020,8
38		9			2,320	1048,2
39		1	3,550	1103,1	—	—
40		2			0,065 ¹	916,4
41		3			0,139	922,8
42	7	4			0,220	928,9
43		5			0,813	970,4
44		6			1,925	1032,7
45	7	7			2,239	1048,1
46		8			2,818	1074,0
47		1	1,630	1000,3	—	—
48		2			0,026 ¹	853,6
49		3			0,111 ¹	865,2
50		4			0,260	883,2
51		5			0,302	888,2
52	8	6			0,564	916,3
53		7			0,780	936,3
54		8			0,807	938,1
55		9			1,015	956,8
56		10			1,131	965,2
57		11			1,190	969,8
58		12			1,307	978,5

Таблица 1 (продолжение)

Номера п/п	Номер изохэнтальпы	Номер точки	$P_1, 10^5 \text{ Па}$	$T_1, \text{ К}$	$P_2, 10^5 \text{ Па}$	$T_2, \text{ К}$
59		1	2,344	1047,5	—	—
60		2			0,013 ¹	883,8
61		3			0,056 ¹	889,2
62		4			0,165	901,2
63		5			0,415	924,2
64	9	6			0,730	949,9
65		7			0,970	966,7
66		8			1,053	972,1
67		9			1,167	979,3
68		10			1,249	985,0
69		11			1,726	1014,0
70		12			1,912	1024,9
71		1	3,040	1081,6	—	—
72		2			0,044 ¹	907,1
73		3			0,257	935,7
74		4			0,473	942,1
75		5			0,747	961,0
76	10	6			1,000	977,3
77		7			1,196	989,5
78		8			1,589	1012,0
79		9			2,070	1037,6
80		10			2,365	1052,2
81		11			2,640	1064,0
82		12			2,680	1066,4
83		1	4,710	1142,7	—	—
84		2			0,080 ¹	935,2
85		3			0,210	944,8
86		4			0,360	954,2
87		5			0,454	960,0
88		6			0,865	984,0
89	11	7			1,135	988,4
90		8			1,407	1012,9
91		9			1,500	1017,5
92		10			1,830	1034,3
93		11			2,320	1056,5
94		12			2,520	1063,8
95		13			3,400	1099,1
96		14			3,740	1111,1
97		15			3,910	1115,9
98		1	5,410	1164,2	—	—
99		2			0,098 ¹	951,6
100		3			0,210	958,3
101		4			0,505	974,4
102		5			1,147	1006,4
103		6			1,390	1017,6
104	12	7			2,130	1051,8
105		8			2,670	1074,2
106		9			3,070	1089,9
107		10			3,600	1109,1
108		11			4,070	1123,8
109		12			4,670	1141,8
110		1	5,470	1167,2	—	—
111		2			0,163	963,2
112		3			0,324	971,9
113		4			0,758	992,5
114		5			1,332	1019,6
115	13	6			1,543	1029,8
116		7			2,037	1051,8
117		8			2,408	1067,2
118		9			2,910	1087,2
119		10			3,048	1092,0
120		11			3,840	1118,0
121		12			4,530	1139,0

Таблица 1 (продолжение)

Номера п/п	Номер изоэнтальпы	Номер точки	$P_1, 10^5 \text{ Па}$	$T_1, \text{ К}$	$P_2, 10^5 \text{ Па}$	$T_2, \text{ К}$
122		1	6,280	1190,4	—	—
123		2			0,421	978,0
124	14	3			0,639	988,0
125		4			0,702	992,2
126		5			1,240	1017,4
127		6			1,985	1051,2
128		7			3,288	1101,3
129		8			4,180	1129,6
130	14	9			4,420	1137,4
131		10			4,600	1142,4
132		11			4,930	1152,9
133		1	6,680	1202,2	—	—
134		2			0,446	983,6
135		3			0,602	992,2
136		4			1,381	1026,2
137		5			1,585	1036,3
138	15	6			2,070	1057,4
139		7			2,734	1083,6
140		8			3,400	1107,2
141		9			3,990	1126,5
142		10			4,320	1136,3
143		11			4,760	1149,6
144		12			4,920	1155,5
145		1	7,390	1219,1	—	—
146		2			1,034	1012,0
147		3			1,118	1016,8
148		4			1,880	1051,0
149		5			2,467	1074,2
150	16	6			2,868	1089,4
151		7			3,470	1110,5
152		8			3,513	1111,6
153		9			4,050	1129,4
154		10			4,470	1142,1
155		11			4,660	1147,9
156		12			4,850	1154,4
157		1	7,930	1234,0	—	—
158		2			1,935	1058,7
159		3			3,320	1109,5
160		4			3,446	1113,5
161	17	5			4,550	1148,0
162		6			4,920	1159,3
163		7			5,730	1181,1
164		8			6,780	1206,8
165		9			6,600	1202,3

¹ — вычислено при помощи РТ-данных [4].

Во время всего измерительного цикла (в ходе измерения адиабатического дроссель-эффекта вдоль одной изоэнтальпы) параметр T_1 поддерживался практически постоянным — в пределах 1,5 К. Величины начальных параметров P_1, T_1 для данной серии измерений усреднялись. Точка с координатами $P_1 T_1$ является начальной точкой и в совокупности с множеством точек с координатами $P_2, T_2, P_2', T_2', P_2'', T_2'' \dots$ образует кривую, представляющую собой изоэнтальпу. Величины P_2 и T_2 измерялись на каждом режиме дросселирования с интервалом 10 мин 3—6 раз в зависимости от их повторяемости и затем усреднялись.

Всего было получено 165 экспериментальных точек вдоль 17 изоэнтальп. Все экспериментальные точки представлены в табл. 1. Часть «сглаженных» изоэнтальп вместе с экспериментальными точками показаны на рис. 1.

Таблица 2

Коэффициенты полиномов (1) и (2)

Номер изоэн- тальпы	$T=a_1+b_1X+c_1X^2+d_1X^3$				$T=a_2+b_2 \ln X+c_2(\ln X)^2+d_2(\ln X)^3$			
	a_1	b_1	c_1	d_1	a_2	b_2	c_2	d_2
1	768,315	309,517	-430,464	540,448	935,210	107,949	25,483	2,149
2	787,134	210,473	-59,951	8,447	942,488	107,486	25,319	1,886
3	808,069	196,434	-74,315	15,404	945,164	95,573	23,596	1,830
4	867,136	119,883	-28,692	4,117	961,730	75,017	23,431	2,111
5	838,306	155,152	-61,943	18,903	950,835	81,923	20,802	1,637
6	892,532	95,579	-18,928	2,527	972,446	68,173	20,725	1,816
7	911,660	78,332	-9,994	0,818	980,815	61,102	22,255	3,129
8	850,318	132,981	-36,013	6,226	953,461	79,795	23,566	2,529
9	883,375	104,177	-23,771	3,764	967,883	69,350	21,424	2,289
10	904,147	82,606	-11,453	1,064	976,260	62,752	23,218	3,281
11	930,590	65,635	-6,176	0,355	990,488	54,647	21,649	3,455
12	946,307	55,624	-3,483	0,099	998,529	50,265	21,328	3,618
13	954,134	53,077	-3,154	0,083	1003,806	48,451	20,955	3,592
14	954,344	55,340	-4,179	0,202	1005,364	47,756	21,144	3,615
15	960,799	51,761	-3,190	0,116	1008,708	46,466	22,041	3,287
16	959,810	53,754	-3,675	0,147	1009,866	47,160	21,830	3,058
17	970,787	50,199	-3,109	0,114	1019,320	39,568	25,459	2,243

Таблица 3

Значения коэффициента Джоуля - Томсона насыщенного пара цезия

T, K	$\alpha_{др},$ $10^{-5} K/Па$	T, K	$\alpha_{др},$ $10^{-5} K/Па$	T, K	$\alpha_{др},$ $10^{-5} K/Па$	T, K	$\alpha_{др},$ $10^{-5} K/Па$
800	279,61	910	124,16	1030	53,988	1140	31,026
810	248,50	920	115,39	1040	50,864	1150	29,815
820	226,17	930	107,18	1050	48,010	1160	28,696
830	211,89	940	99,565	1060	45,404	1170	27,662
840	201,29	950	92,534	1070	43,019	1180	26,705
850	186,00	960	86,072	1080	40,837	1190	25,819
860	174,61	970	80,150	1090	38,836	1200	24,997
870	163,07	980	74,734	1100	37,001	1210	24,233
880	153,08	990	69,789	1110	35,315	1220	23,524
890	143,12	1000	65,278	1120	33,766	1230	22,865
900	133,44	1010	61,164	1130	32,340	1240	22,251
		1020	57,411				

Изоэнтальпы аппроксимировались по методу наименьших квадратов полиномами вида

$$T=a_1+b_1X+c_1X^2+d_1X^3, \quad (1)$$

$$T=a_2+b_2 \ln X+c_2(\ln X)^2+d_2(\ln X)^3. \quad (2)$$

Здесь $X=1,01972 \cdot 10^{-5} \cdot P$, где P — давление пара, Па; T — температура, К. Оба полинома удовлетворительно описывают экспериментальные данные. Максимальное отклонение точек от аппроксимирующих кривых составляет $\pm 0,230$. В табл. 2 даны коэффициенты полиномов (1) и (2) для всех изоэнтальп.

Экстраполяция к нулевому давлению производилась с помощью полинома (1). Экстраполяция к линии насыщения [4] производилась с помощью полинома (2).

Коэффициент Джоуля — Томсона $\alpha_{др}$ вычислялся как частная производная $(\partial T/\partial P)_i$, где i — энтальпия. При этом вычислить величину погрешности определения $\alpha_{др}$ не представляется возможным. О точности полученных результатов можно судить лишь по величине отклонений $\alpha_{др}$ от соответствующих интерполяционных зависимостей.

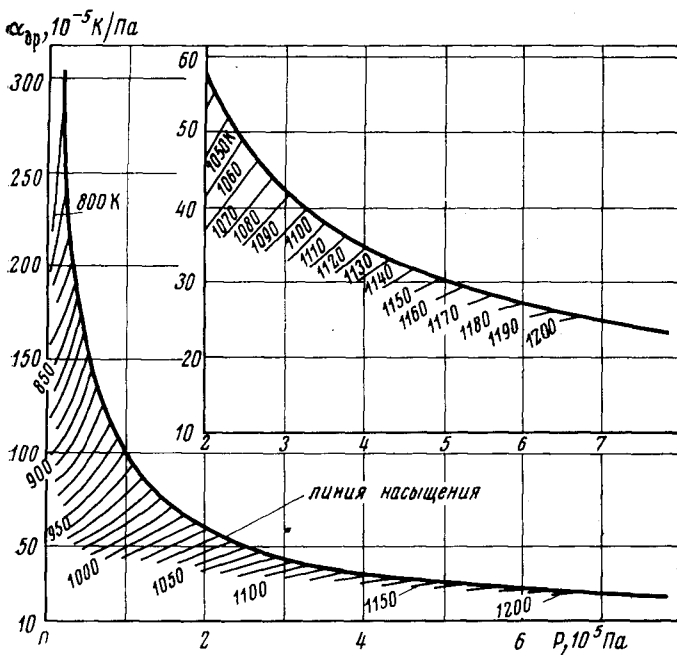


Рис. 2. Зависимость коэффициента Джоуля — Томсона пара цезия от давления

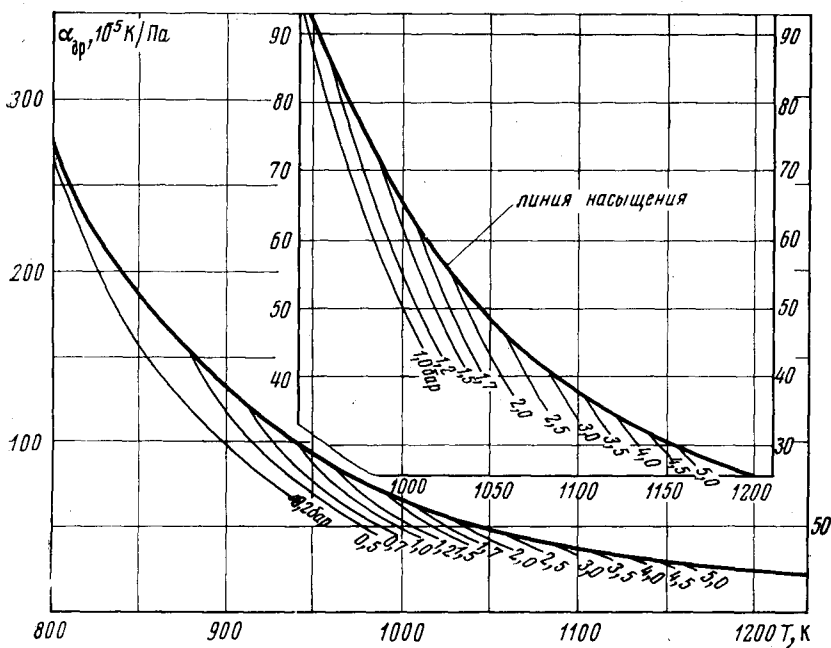


Рис. 3. Зависимость коэффициента Джоуля — Томсона пара цезия от температуры

Полученные данные позволили построить зависимости $\alpha_{др}$ от давления и температуры (рис. 2 и 3). На свободных полях этих рисунков кривые изображены в более крупных масштабах.

Изотермы в координатах $\alpha_{др} - P$ аппроксимированы по методу наименьших квадратов зависимостью вида

$$\alpha_{др} = a + bP^n, \quad (3)$$

где P — давление; a, b, n — константы. Среднеквадратичное отклонение аппроксимируемых величин $\alpha_{др}$ от вычисленных с помощью (3) — 2,9%.

Изобары в координатах $\alpha_{др}—T$ аппроксимированы по методу наименьших квадратов зависимостями вида

$$\alpha_{др} = \exp [c + d(\ln T)^m + e(\ln T)^k], \quad (4)$$

$$\alpha_{др} = [c + d(\ln T)^m + e(\ln T)^k]^{-1}. \quad (5)$$

Здесь T — температура; c, d, e, m, k — константы. Лучшая из приведенных зависимостей (т. е. с наименьшим отклонением аппроксимируемых

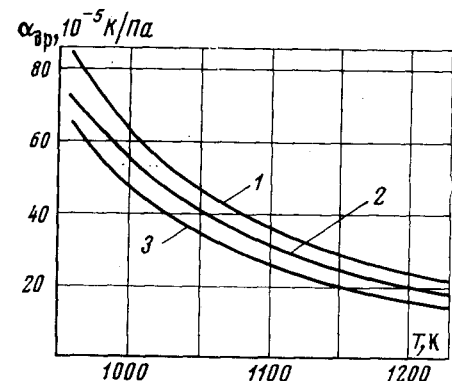


Рис. 4. Зависимость коэффициента Джоуля — Томсона насыщенного пара цезия от температуры: 1 — данные авторов; 2 — рассчитано с помощью PVT-данных [5]; 3 — по данным [7]

PVT-данным Стоуна и Эвинга [5]. Необходимые для вычислений значения теплоемкости C_p насыщенного пара рассчитаны с помощью выражения, данного в работе [6]. Результаты расчетов $\alpha_{др}$ представлены на рис. 4 (кривая 2). Сравнительно большие расхождения (11—16%) рассчитанных величин с данными, полученными в настоящей работе (кривая 1), можно объяснить ошибкой, накопленной при многократном дифференцировании PVT-данных [5] в ходе вычислений. Кривая 3 представляет собой зависимость $\alpha_{др}$ насыщенного пара цезия от температуры, полученную расчетным путем в работе [7] для теоретической модели пара цезия в виде идеальной диссоциирующей смеси.

ИМЕТ АН СССР им. А. А. Байкова

Поступила в редакцию
9 VIII 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. И. И. Новиков, В. В. Рошупкин, М. М. Ляховицкий. Завод. лабор., № 8, 988, 1975.
2. E. S. Burnett, J. R. Roebuck. Phys. Rev. (2), 22, 590, 1923.
3. И. И. Новиков, В. В. Рошупкин, М. М. Ляховицкий, Я. В. Куйк. ТВТ, 14, № 3, 507, 1976.
4. Э. Э. Шпильрайн, Э. В. Никаноров. ТВТ, 10, № 2, 297, 1972.
5. J. P. Stone, C. T. Ewing et al. J. Chem. Eng. Data, 11, № 4, 473, 1966.
6. J. P. Stone, C. T. Ewing et al. J. Chem. Eng. Data, 11, № 4, 460, 1966.
7. Н. И. Агапова, Б. Л. Паскарь, Л. Р. Фокин. Атомная энергия, 15, № 4, 292, 1963.