

ЕДИНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКИХ СМЕСЕЙ $^3\text{He} - ^4\text{He}$

Р.М. Сибилева, А.В. Мериуц, Л.В. Карнацевич, М.А. Хажмурадов, Э.И. Винокуров*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
г. Харьков, Украина; E-mail: rsibileva@mail.ru;*

**Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, 61002, ул. Фрунзе, 21, Украина*

На основании полученных в ИФТТМТ ННЦ ХФТИ экспериментальных данных и построенного на их основе единого уравнения состояния для жидких изотопических растворов $^3\text{He} - ^4\text{He}$ рассчитан ряд важных термодинамических характеристик этих растворов в интервале температур 2,25...4,2 К и давлений 0...10 МПа. Составлены инженерные таблицы для величин: молярного объема (V), плотности (ρ), изобарического коэффициента теплового расширения (α), изотермического коэффициента сжимаемости (γ) и фактора сжимаемости (Z) с шагом по температуре и давлению, достаточным для линейного интерполирования данных. Полученные результаты важны для тепловых расчетов низкотемпературных криостатов, основанных на методе растворения ^3He в ^4He .

ВВЕДЕНИЕ

Жидкие и газообразные изотопы гелия являются уникальными хладагентами, широко используемыми в современной криогенной технике. Жидкий кипящий ^4He может обеспечить поддержание температуры на уровне от 4,2 до 0,8 К. Откачкой паров над жидким ^3He можно получить температуры до 0,3 К. Растворы $^3\text{He}-^4\text{He}$ используются для получения сверхнизких температур (до нескольких тысячных Кельвина) методом охлаждения, основанным на растворении ^3He в ^4He [1]. Этот метод успешно применяется во многих криогенных лабораториях. При разработке криостатов растворения необходимы подробные данные о термодинамических характеристиках смесей в широкой области температур и давлений.

В связи с неидеальностью растворов $^3\text{He}-^4\text{He}$ в жидкой и плотной флюидной фазах необходимые P - V - T -данные не могут быть получены, исходя из соответствующих данных для чистых изотопов [2].

В лаборатории молекулярной физики и криогенной техники ННЦ ХФТИ были экспериментально определены молярные объемы жидких растворов $^3\text{He}-^4\text{He}$ при давлениях до 10 МПа в области температур 1,5...4,2 К [3]. Исследованы растворы с концентрацией ^3He : 35,2; 50,7; 65,1 % и чистые ^3He , ^4He . Полученные данные позволили в настоящей работе получить единое эмпирическое уравнение состояния жидких растворов $^3\text{He}-^4\text{He}$ в жидкой фазе и на основании этого уравнения рассчитать ряд важных термодинамических характеристик растворов.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ РАСТВОРОВ $^3\text{He} - ^4\text{He}$ И РАСЧЕТ ИХ НЕКОТОРЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Обработка массива экспериментальных P - V - T -данных для смесей $^3\text{He}-^4\text{He}$ и чистых изотопов из [3], а также аналогичных данных для смесей и чистых веществ в жидкой фазе вдоль линии насыщенных паров и вдоль линии начала затвердевания [4] позволила получить аппроксимирующее выражение для уравнения состояния в виде зависимости давления (P) от температуры (T), молярного объема (V) и концентрации смеси (c). Это уравнение, единое для всех жидких смесей $^3\text{He}-^4\text{He}$ в интервале температур 2,25...4,2 К и давлений 0...10 МПа имеет вид [5]:

$$P(T, V, c) = B_0(T, V) + c \cdot B_1(T, V). \quad (1)$$

Вид функций $B_0(T, V)$ и $B_1(T, V)$ аналогичен аппроксимирующему выражению для $P(T, V)$, предложенному нами в работе [6] для эквимольной смеси, и близок к аналитической форме уравнения состояния для ^4He , предложенного Мак-Карти [7]:

$$B_0(T, V) = \sum_{i=1}^4 (10^{2i+5} \cdot \sum_{j=1}^6 c_{ij} \cdot T^{(j-1)}) \cdot V^{-(i+2)}; \quad (2)$$
$$B_1(T, V) = \sum_{i=1}^4 (10^{2i+5} \cdot \sum_{j=1}^6 n_{ij} \cdot T^{(j-1)}) \cdot V^{-(i+2)}.$$

Параметры уравнения c_{ij} и n_{ij} приведены в таблице работы [5]. Уравнение содержит 48 членов. Такое количество слагаемых определяется тем, что уравнение (1) является разложением величин давления P по трем параметрам: температуре, молярному объему и концентрации смеси.

На основании полученного единого уравнения состояния была создана программа для расчета ряда термодинамических характеристик смесей.

Для заданных значений давления и для ряда температур были рассчитаны: V - молярный объем раствора, см³/моль; ρ - его плотность $\rho = M/V$ (где $M = M(^3\text{He}) \cdot c(^3\text{He}) + M(^4\text{He}) \cdot c(^4\text{He})$ - усредненная молярная масса для данного раствора) (г/см³); изобарический коэффициент теплового расширения $\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$, 1/К; изотермический коэффициент сжимаемости $\gamma = - \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$, 1/МПа; и фактор сжимаемости $Z = PV / RT$, где R - газовая постоянная.

Для растворов с концентрациями 20, 40, 60 и 80 % ³He приведены таблицы рассчитанных величин в интервале температур и давлений, где смеси находятся в жидком состоянии. Следует отметить, что максимальная приведенная температура для каждой смеси выбрана на 0,1 К ниже критической температуры этой смеси [8], так как вблизи критических точек смесей полученное уравнение использовать нельзя. Погрешность определения V по уравнению (1) не превышает 0,2 % при высоких давлениях, а при давлениях 0,1...5 МПа эта величина существенно меньше. Количество значащих цифр в значениях других величин соответствует точности их определения.

c=20%

P=0,1 МПа						P = 0,5 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.25	0.1319	28.87	0.183	0.015	0.154	2.25	0.1397	27.25	0.117	0.023	0.729
2.50	0.1309	29.08	0.180	0.042	0.140	2.50	0.1387	27.44	0.120	0.031	0.660
2.75	0.1292	29.46	0.197	0.061	0.129	2.75	0.1375	27.67	0.127	0.037	0.605
3.00	0.1270	29.98	0.229	0.078	0.120	3.00	0.1362	27.96	0.137	0.045	0.561
3.25	0.1242	30.65	0.276	0.099	0.113	3.25	0.1345	28.30	0.150	0.054	0.524
3.50	0.1208	31.50	0.342	0.12	0.108	3.50	0.1325	28.72	0.166	0.065	0.494
3.70	0.1176	32.36	0.413	0.15	0.105	3.75	0.1302	29.24	0.186	0.078	0.469
						4.00	0.1274	29.87	0.211	0.090	0.449
						4.20	0.1251	30.43	0.238	0.095	0.436
P =1 МПа						P =2 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.25	0.1467	25.95	0.0836	0.019	1.388	2.25	0.1569	24.26	0.055	0.010	2.594
2.50	0.1459	26.09	0.0864	0.022	1.255	2.50	0.1564	24.33	0.0573	0.014	2.342
2.75	0.1450	26.24	0.0899	0.026	1.148	2.75	0.1558	24.43	0.0585	0.017	2.137
3.00	0.1440	26.43	0.0941	0.030	1.060	3.00	0.1551	24.54	0.0597	0.020	1.968
3.25	0.1429	26.64	0.0993	0.036	0.986	3.25	0.1543	24.67	0.0613	0.023	1.826
3.50	0.1415	26.90	0.106	0.043	0.925	3.50	0.1534	24.82	0.0635	0.026	1.706
3.75	0.1398	27.22	0.114	0.051	0.873	3.75	0.1523	24.99	0.0663	0.030	1.604
4.00	0.1380	27.59	0.123	0.056	0.830	4.00	0.1511	25.19	0.0695	0.033	1.515
4.20	0.1364	27.90	0.132	0.056	0.799	4.20	0.1501	25.35	0.0721	0.033	1.452
P = 4 МПа						P = 6 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.25	0.1714	22.21	0.036	0.007	4.749	2.40	0.1822	20.90	0.027	0.014	6.285
2.50	0.1710	22.26	0.036	0.011	4.284	2.50	0.1818	20.93	0.027	0.014	6.044
2.75	0.1705	22.33	0.036	0.013	3.907	2.75	0.1812	21.01	0.027	0.014	5.515
3.00	0.1699	22.40	0.036	0.014	3.593	3.00	0.1806	21.08	0.027	0.014	5.072
3.25	0.1693	22.48	0.036	0.015	3.329	3.25	0.1800	21.15	0.027	0.014	4.696
3.50	0.1687	22.57	0.037	0.015	3.103	3.50	0.1795	21.21	0.027	0.014	4.374
3.75	0.1680	22.66	0.038	0.017	2.908	3.75	0.1789	21.28	0.027	0.014	4.095
4.00	0.1673	22.76	0.038	0.018	2.738	4.00	0.1783	21.35	0.027	0.014	3.852
4.20	0.1666	22.84	0.039	0.020	2.617	4.20	0.1778	21.41	0.027	0.014	3.679
P = 8 МПа						P = 10 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.80	0.1897	20.07	0.021	0.012	6.899	3.25	0.1960	19.42	0.017	0.011	7.190
3.00	0.1892	20.12	0.021	0.012	6.455	3.50	0.1954	19.48	0.017	0.011	6.695
3.25	0.1886	20.18	0.021	0.012	5.976	3.75	0.1948	19.54	0.017	0.011	6.268
3.50	0.1881	20.24	0.021	0.012	5.565	4.00	0.1942	19.60	0.017	0.011	5.894
3.75	0.1875	20.30	0.021	0.012	5.209	4.20	0.1938	19.64	0.017	0.011	5.625
4.00	0.1870	20.36	0.021	0.012	4.898						
4.20	0.1866	20.40	0.021	0.012	4.676						

c=40%

P = 0,1 МПа						P = 0,5 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.25	0.1169	30.87	0.247	0.027	0.165	2.25	0.1258	28.7	0.141	0.019	0.767
2.50	0.1162	31.06	0.239	0.047	0.149	2.50	0.1249	28.89	0.143	0.033	0.695
2.75	0.1144	31.55	0.265	0.078	0.138	2.75	0.1238	29.16	0.152	0.043	0.638
3.00	0.1118	32.29	0.321	0.11	0.129	3.00	0.1223	29.51	0.166	0.052	0.592
3.25	0.1084	33.28	0.413	0.14	0.123	3.25	0.1206	29.93	0.184	0.062	0.554
3.50	0.1043	34.59	0.560	0.18	0.119	3.50	0.1186	30.44	0.205	0.073	0.523
						3.75	0.1162	31.05	0.232	0.087	0.498
						4.00	0.1135	31.79	0.266	0.10	0.478
						4.20	0.1111	32.49	0.305	0.12	0.465
P = 1 МПа						P = 2 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.25	0.1332	27.10	0.096	0.018	1.449	2.25	0.1436	25.13	0.061	0.011	2.688
2.50	0.1325	27.24	0.098	0.024	1.311	2.50	0.1431	25.22	0.0624	0.015	2.427
2.75	0.1316	27.42	0.102	0.028	1.200	2.75	0.1425	25.32	0.0638	0.017	2.215
3.00	0.1306	27.63	0.107	0.033	1.108	3.00	0.1419	25.44	0.0654	0.020	2.040
3.25	0.1295	27.87	0.114	0.038	1.030	3.25	0.1411	25.57	0.0673	0.023	1.893
3.50	0.1281	28.16	0.122	0.045	0.968	3.50	0.1403	25.73	0.0697	0.027	1.769
3.75	0.1266	28.51	0.131	0.053	0.915	3.75	0.1393	25.91	0.0726	0.031	1.663
4.00	0.1248	28.91	0.141	0.059	0.870	4.00	0.1382	26.12	0.0759	0.033	1.571
4.20	0.1233	29.26	0.152	0.060	0.838	4.20	0.1373	26.3	0.0787	0.035	1.506
P = 4 МПа						P = 6 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.25	0.1578	22.87	0.0378	0.006	4.891	2.25	0.1685	21.42	0.029	0.013	6.871
2.50	0.1575	22.92	0.0378	0.010	4.411	2.50	0.1680	21.49	0.029	0.013	6.203
2.75	0.1570	22.98	0.0379	0.012	4.022	2.75	0.1675	21.55	0.029	0.013	5.656
3.00	0.1565	23.05	0.0382	0.013	3.698	3.00	0.1670	21.61	0.029	0.013	5.200
3.25	0.1560	23.13	0.0386	0.014	3.425	3.25	0.1665	21.67	0.029	0.013	4.814
3.50	0.1554	23.22	0.0393	0.015	3.192	3.50	0.1660	21.74	0.029	0.013	4.483
3.75	0.1548	23.31	0.0401	0.017	2.991	3.75	0.1655	21.80	0.029	0.013	4.196
4.00	0.1541	23.41	0.0410	0.019	2.817	4.00	0.1650	21.87	0.029	0.013	3.947
4.20	0.1536	23.50	0.0418	0.019	2.693	4.20	0.1646	21.93	0.029	0.013	3.769
P = 8 МПа						P = 10 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.65	0.1761	20.49	0.022	0.012	7.441	3.05	0.1825	19.78	0.0184	0.011	7.802
2.75	0.1759	20.52	0.022	0.012	7.180	3.25	0.1821	19.82	0.0184	0.011	7.337
3.00	0.1754	20.58	0.022	0.012	6.601	3.50	0.1816	19.87	0.0184	0.011	6.830
3.25	0.1749	20.63	0.022	0.012	6.110	3.75	0.1812	19.92	0.0184	0.011	6.390
3.50	0.1745	20.68	0.022	0.012	5.688	4.00	0.1808	19.97	0.0184	0.011	6.005
3.75	0.174	20.74	0.022	0.012	5.322	4.20	0.1804	20.01	0.0184	0.011	5.732
4.00	0.1736	20.79	0.022	0.012	5.003						
4.20	0.1732	20.84	0.022	0.012	4.776						

c=60%

P = 0,1 МПа						P = 0,5 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.25	0.1034	33.00	0.319	0.015	0.176	2.25	0.1130	30.19	0.164	0.023	0.807
2.50	0.1024	33.33	0.325	0.062	0.160	2.50	0.1122	30.42	0.170	0.037	0.732
2.75	0.1003	34.02	0.375	0.10	0.149	2.75	0.1110	30.75	0.182	0.048	0.673
3.00	0.0973	35.06	0.476	0.14	0.141	3.00	0.1095	31.16	0.200	0.059	0.625
3.20	0.0942	36.22	0.618	0.19	0.136	3.25	0.1077	31.67	0.223	0.070	0.586
						3.50	0.1057	32.27	0.253	0.083	0.555
						3.75	0.1034	33.01	0.290	0.098	0.530
						4.00	0.1006	33.92	0.340	0.12	0.510
P = 1 МПа						P = 2 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.25	0.1207	28.27	0.107	0.019	1.512	2.25	0.1311	26.02	0.0662	0.011	2.782
2.50	0.1200	28.43	0.111	0.025	1.368	2.50	0.1307	26.10	0.0676	0.016	2.512
2.75	0.1192	28.62	0.115	0.030	1.252	2.75	0.1302	26.21	0.0691	0.018	2.294
3.00	0.1182	28.86	0.122	0.035	1.157	3.00	0.1295	26.34	0.0709	0.020	2.112
3.25	0.1171	29.13	0.129	0.041	1.078	3.25	0.1289	26.48	0.0731	0.023	1.960
3.50	0.1158	29.45	0.138	0.047	1.012	3.50	0.1281	26.64	0.0757	0.027	1.831
3.75	0.1144	29.83	0.149	0.055	0.957	3.75	0.1271	26.83	0.0787	0.031	1.722
4.00	0.1127	30.27	0.161	0.062	0.910	4.00	0.1261	27.05	0.0821	0.033	1.627
P = 4 МПа						P = 6 МПа					

T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.25	0.1450	23.52	0.0397	0.007	5.031	2.25	0.1552	21.98	0.029	0.010	7.051
2.50	0.1447	23.57	0.0398	0.010	4.538	2.50	0.1540	22.04	0.029	0.010	6.362
2.75	0.1443	23.64	0.0401	0.011	4.136	2.75	0.1544	22.09	0.029	0.010	5.799
3.00	0.1439	23.71	0.0404	0.012	3.803	3.00	0.1540	22.15	0.029	0.010	5.329
3.25	0.1434	23.78	0.0409	0.013	3.522	3.25	0.1536	22.21	0.029	0.011	4.932
3.50	0.1429	23.87	0.0416	0.015	3.282	3.50	0.1532	22.27	0.029	0.011	4.592
3.75	0.1424	23.96	0.0424	0.017	3.075	3.75	0.1528	22.33	0.030	0.012	4.299
4.00	0.1417	24.07	0.0433	0.018	2.896	4.00	0.1523	22.40	0.030	0.013	4.043
P = 8 МПа						P = 10 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.50	0.1630	20.93	0.023	0.01	8.056	2.85	0.1693	20.15	0.019	0.009	8.504
2.75	0.1626	20.99	0.023	0.01	7.345	3.00	0.1691	20.18	0.019	0.009	8.091
3.00	0.1622	21.04	0.023	0.01	6.750	3.25	0.1687	20.23	0.019	0.009	7.487
3.25	0.1618	21.09	0.023	0.01	6.246	3.50	0.1683	20.27	0.019	0.009	6.968
3.50	0.1614	21.14	0.023	0.01	5.813	3.75	0.1680	20.31	0.019	0.009	6.516
3.75	0.1610	21.19	0.023	0.01	5.438	4.00	0.1676	20.36	0.019	0.009	6.122
4.00	0.1606	21.24	0.024	0.01	5.111						

c=80%

P = 0,1 МПа						P = 0,5 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.25	0.0917	35.06	0.374	0.10	0.187	2.25	0.1015	31.66	0.184	0.047	0.846
2.50	0.0893	36.01	0.460	0.11	0.173	2.50	0.1003	32.04	0.201	0.048	0.771
2.75	0.0866	37.10	0.575	0.13	0.162	2.75	0.0991	32.44	0.218	0.053	0.709
3.00	0.0833	38.58	0.771	0.19	0.155	3.00	0.0977	32.90	0.240	0.063	0.660
3.10	0.0816	39.39	0.900	0.23	0.153	3.25	0.0960	33.49	0.268	0.078	0.620
						3.50	0.0939	34.22	0.308	0.096	0.588
						3.60	0.0930	34.56	0.328	0.105	0.578
P = 1 МПа						P = 2 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.25	0.1092	29.44	0.118	0.026	1.574	2.25	0.1195	26.90	0.0711	0.011	2.877
2.50	0.1085	29.64	0.124	0.028	1.426	2.50	0.1191	26.99	0.0728	0.016	2.598
2.75	0.1077	29.86	0.130	0.031	1.306	2.75	0.1186	27.11	0.0744	0.018	2.372
3.00	0.1068	30.11	0.137	0.036	1.207	3.00	0.1180	27.24	0.0764	0.020	2.184
3.25	0.1057	30.40	0.145	0.042	1.125	3.25	0.1174	27.38	0.0787	0.023	2.027
3.50	0.1045	30.75	0.155	0.050	1.057	3.50	0.1167	27.55	0.0815	0.026	1.894
3.60	0.1040	30.91	0.160	0.053	1.033	3.60	0.1164	27.62	0.0827	0.028	1.846
P = 4 МПа						P = 6 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.25	0.1330	24.17	0.0416	0.006	5.170	2.25	0.1427	22.53	0.030	0.009	7.227
2.50	0.1327	24.22	0.0417	0.010	4.663	2.50	0.1424	22.58	0.030	0.010	6.519
2.75	0.1323	24.29	0.0420	0.011	4.250	2.75	0.1420	22.63	0.030	0.010	5.941
3.00	0.1320	24.36	0.0425	0.012	3.907	3.00	0.1417	22.69	0.030	0.010	5.458
3.25	0.1316	24.43	0.0430	0.013	3.617	3.25	0.1414	22.74	0.030	0.010	5.050
3.50	0.1311	24.51	0.0437	0.014	3.370	3.50	0.1410	22.80	0.031	0.011	4.702
3.60	0.1309	24.55	0.0440	0.015	3.282	3.60	0.1408	22.82	0.031	0.011	4.576
P = 8 МПа						P = 10 МПа					
T	ρ	V	γ	α	Z	T	ρ	V	γ	α	Z
2.30	0.1505	21.35	0.024	0.01	8.936	2.65	0.1566	20.52	0.020	0.009	9.318
2.50	0.1502	21.41	0.024	0.01	8.240	2.75	0.1565	20.54	0.020	0.009	8.988
2.75	0.1498	21.46	0.024	0.01	7.510	3.00	0.1561	20.59	0.020	0.009	8.258
3.00	0.1495	21.51	0.024	0.01	6.899	3.25	0.1558	20.64	0.020	0.009	7.639
3.25	0.1491	21.55	0.024	0.01	6.382	3.50	0.1555	20.68	0.020	0.009	7.107
3.50	0.1488	21.60	0.024	0.01	5.939	3.60	0.1553	20.69	0.020	0.009	6.910
3.60	0.1487	21.62	0.024	0.01	5.779						

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ и обработка экспериментальных данных, полученных в лаборатории молекулярной физики и техники низких температур ИФТТМТ ННЦ ХФТИ, позволили получить единое уравнение состояния для всех смесей ^3He - ^4He в жидкой фазе и на основании него составить программу для вычисления ряда важных термодинамических величин этих жидких

растворов в интервале температур 2,25... 4,2 К и давлений 0...10 МПа.

Дальнейшим направлением работы является расчет интегральных термодинамических характеристик жидких смесей ^3He - ^4He (энтропии, энтальпии и др.), а также составление подробных инженерных таблиц всех термодинамических величин.

ЛИТЕРАТУРА.

1. О.В. Лоунасмаа. *Принципы и методы получения температур ниже 1 К*. М: «Мир», 1977, с.30-78.
2. И.В. Богоявленский, Л.В. Карнацевич, В.Г. Конарева. Концентрационная зависимость избыточных молярных объемов смесей $^3\text{He} - ^4\text{He}$ // *Физика низких температур*. 1980, 6, №10, с.1241-1254.
3. И.В. Богоявленский, С.И. Юрченко. Измерение молярных объемов жидких растворов ^3He в ^4He под давлением до 100 атм при температурах 1,5–4,2 К // *Физика низких температур*. 1976, т.2, №11, с. 1379 – 1387.
4. Б.Н. Есельсон, В.Н. Григорьев, В.Г. Иванцов, Э.Я. Рудавский, Д.Д. Саникидзе, И.А. Сербин. *Растворы квантовых жидкостей $^3\text{He} - ^4\text{He}$* . М: «Наука», 1973, 423 с.
5. Р.М. Сибилева, А.В. Мериуц, Л.В. Карнацевич, М.А. Хажмурадов. Единое уравнение состояния жидких растворов $^3\text{He} - ^4\text{He}$ в области температур 2,25 – 4,2 К при давлениях до 10 МПа во всем интервале концентраций // *Физика низких температур*. 2004, т.30, №9, с. 928 – 931.
6. Л.В. Карнацевич, Р.М. Сибилева, М.А. Хажмурадов, И.Н. Шаповал, А.В. Мериуц. Уравнение состояния эквимольной смеси $^3\text{He} - ^4\text{He}$ // *Физика низких температур*. 2002, т.28, №4, с. 338 -343.
7. R.D. Mc Carty. Thermodynamic Properties of Helium 4 from 2 to 1500 K at Pressures to 10^8 Pa // *Journal of Physical Chemical Reference Data*. 1973, v.2, №4, p. 923 – 1042.
8. B. Wallace, Jr. And Horst Meyer. Pressure – Density – Temperature Relations of $\text{He}^3 - \text{He}^4$ Mixtures near the Liquid – Vapor Critical Point // *Physical Review A*. 1972, v.5, №2, p. 953 – 964.

ЄДИНЕ РІВНЯННЯ СТАНУ І ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ ТЕРМОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РІДКИХ СУМІШЕЙ $^3\text{He} - ^4\text{He}$

Р.М. Сибільова, А.В. Мериуц, Л.В. Карнацевич, М.А. Хажмурадов, Е.І. Винокуров

На підставі отриманих у ІФТТМТ ННЦ ХФТІ експериментальних даних і побудованого на їхній основі єдиного рівняння стану для рідких ізотопічних розчинів $^3\text{He} - ^4\text{He}$ розрахований ряд важливих термодинамічних характеристик цих розчинів в інтервалі температур 2,25...4,2 К і тисків 0...10 МПа. Складено інженерні таблиці для величин: молярного обсягу (V), щільності (ρ), ізобаричного коефіцієнта теплового розширення (α), ізотермічного коефіцієнта стискальності (γ) і фактора стискальності (Z) з кроком по температурі і тиску, достатнім для лінійної інтерполяції даних. Отримані результати важливі для теплових розрахунків низькотемпературних кріостатів, заснованих на методі розчинення ^3He в ^4He .

COMMON EQUATION OF STATE AND DIFFERENTIAL THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE LIQUID $^3\text{He} - ^4\text{He}$ MIXTURES

R.M. Sibilyova, A.V. Meriuts, L.V. Karnatsevich, M.A. Khazhmuradov, E.I. Vinokurov

A number of important thermodynamic characteristics of the liquid $^3\text{He} - ^4\text{He}$ isotope solutions for the temperatures 2,25...4,2 K and pressures 0...10 Mpa is calculated basing on the obtained at the NSC KIPT experimental data and common equation of state built on basis of these data. Engineering tables are calculated for molar volume (V), density (ρ), isobaric thermal expansion coefficient (α), isothermal compressibility factor (γ) and compressibility factor (Z) with temperature and pressure increment sufficient for linear interpolation of the data. Obtained results have a great value for thermal calculations of the low-temperature cryostats, basing on the method of ^3He dissolving in ^4He .