

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКИХ РАСТВОРОВ $^3\text{He}$ – $^4\text{He}$ С КОНЦЕНТРАЦИЯМИ 20, 60 И 80 % $^3\text{He}$

*Р.М. Сибилева, Л.В. Карнацевич, М.В. Мельников\*, М.А. Хажмурадов*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
 Харьков, Украина*

*E-mail: rsibileva@mail.ru;*

*\*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина*

Проведен расчет интегральных термодинамических характеристик жидких растворов  $^3\text{He}$  –  $^4\text{He}$  с концентрациями 20, 60 и 80 %  $^3\text{He}$  в интервале температур и давлений, ограниченной областью, где раствор находится в жидком состоянии. Рассчитаны величины мольной энтропии, свободной энергии, энтальпии, потенциала Гиббса и полной энергии с шагом по температуре и давлению, достаточным для линейного интерполирования данных. Данный расчет является завершающим этапом составления таблиц термодинамических величин для жидких растворов изотопов гелия.

### ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей работе нами была подробно описана методика расчета интегральных термодинамических характеристик жидких растворов изотопов гелия. Для раствора, содержащего 40 %  $^3\text{He}$ , был рассчитан ряд термодинамических характеристик, таких как мольные значения энтропии ( $S$ ), свободной энергии ( $F$ ), энтальпии ( $H$ ), потенциала Гиббса ( $G$ ), полной энергии ( $E$ ) при температурах 2,25...4,2 К и давлениях 0...10 МПа [1]. Для завершения работы по созданию таблиц термодинамических характеристик жидких растворов изотопов гелия были проведены расчеты указанных величин для растворов с содержанием 20, 60 и 80 %  $^3\text{He}$ , для которых ранее был рассчитан ряд дифференциальных термодинамических характеристик [2].

### РАСЧЕТ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Методика расчета была подробно описана ранее [1]. Вычисления опираются на единое уравнение состояния для жидких растворов изотопов гелия [3], построенное нами ранее на основании экспериментальных данных, полученных в лаборатории низких температур ННЦ ХФТИ [4] для чистых изотопов гелия и их растворов. Значения энтропии и свободной энергии жидкого раствора с определенным содержанием  $^3\text{He}$  ( $x$ ) при заданной температуре ( $T$ ) и молярном объеме ( $V$ ) вычислялись по формулам:

$$S = S_{y.n.} - \sum_{i=1}^4 \frac{10^{2i+5}}{i+1} (\rho^{i+1} - \rho_{y.n.}^{i+1}) \sum_{j=2}^6 (j-1) T^{j-2} (c_{ij} + xn_{ij}); \quad (1)$$

$$F = F_{y.n.} + \sum_{i=1}^4 \frac{10^{2i+5}}{i+1} (\rho^{i+1} - \rho_{y.n.}^{i+1}) \sum_{j=1}^6 T^{j-1} (c_{ij} + xn_{ij}). \quad (2)$$

Здесь  $S_{y.n.}$ ,  $F_{y.n.}$ ,  $\rho_{y.n.} = 1/V_{y.n.}$  – значения соответствующих величин в жидкости на линии насыщенного пара (подстрочный индекс «y.n.» обозначает величину на линии упругости пара),  $c_{ij}$  и  $n_{ij}$  – коэффициенты единого уравнения состояния  $P = P(T, V, x)$  [3],  $x$  – концентрация раствора,  $\rho = 1/V$ . Для определения значений энтропии и свободной энергии жидко-

сти на линии насыщенного пара, необходимых для этих расчетов, предварительно был проведен ряд вычислений.

На первом этапе вычислялись значения энтропии и энтальпии соответствующей насыщенной паровой смеси по формулам для реального газа с учетом второго (B) и третьего (C) вириальных коэффициентов:

$$S_n = S_0 - R \cdot \ln \left( \frac{\rho RT}{P_0} \right) - R \cdot \left( B + T \frac{dB}{dT} \right) \cdot (\rho - \rho_0) - \frac{R}{2} \cdot \left( C + T \frac{dC}{dT} \right) \cdot (\rho^2 - \rho_0^2) + 2,5 \cdot R \cdot \ln \frac{T}{T_0}, \quad (3)$$

$$H_n = 1,5RT + \frac{P}{\rho} - RT^2 \frac{dB}{dT} \cdot (\rho - \rho_0) - \frac{RT^2}{2} \cdot \frac{dC}{dT} (\rho^2 - \rho_0^2). \quad (4)$$

Здесь  $S_0$  – энтропия газовой смеси в стандартном состоянии;  $P_0$ ,  $T_0$  – параметры стандартного состояния;  $\rho_0$  – плотность идеального газа в стандартном состоянии,  $\rho_0 = P_0/RT_0$  (в качестве стандартного состояния выбрано  $P_0 = 0,1013$  МПа,  $T_0 = 60$  К; при этих параметрах смесь близка к идеальному газу) [1,5];  $\rho$  – плотность пара на линии насыщения. Второй и третий вириальные коэффициенты смеси получены аддитивным способом из соответствующих коэффициентов для чистых компонент [6,7].

Далее, используя известные термодинамические соотношения

$$H = G + TS, F = G - PV, E = G - PV + TS, \quad (5)$$

были вычислены значения  $F$ ,  $G$  и  $E$  пара на линии насыщения.

Значения энтропии и свободной энергии для жидкости на линии насыщения связаны с соответствующими величинами для пара соотношениями:

$$S_{\text{жидк.}}(T) = S_{\text{пара}}(T) - \Delta H / T; \quad (6)$$

$$F_{\text{жидк.}}(T) = F_{\text{пара}}(T) + P_{y.n.} \cdot \Delta V,$$

где  $\Delta H$  – теплота испарения жидкого раствора;  $\Delta V$  – скачок молярного объема при переходе из пара в жидкость;  $P_{y.n.}$  – давление на линии упругости пара.

Применяя такой порядок расчетов, были получены значения энтропии и свободной энергии жидкости на линии насыщенного пара при заданных температурах, используемые впоследствии при вычислениях по формулам (1)-(2).

При вычислении по формулам (3) и (4) энтропии и энтальпии пара требуются значения молярного объема насыщенного паровой смеси ( $\rho=1/V$ ) при заданных температурах. Экспериментальные данные для молярных объемов паровых смесей на линии насыщения имеются только до 3 К [8].

Для раствора, содержащего 20 %  $^3\text{He}$ , критическая температура  $T_{\text{кр}} = 4,84$  К, молярный объем в критической точке  $V_{\text{кр}} = 56,64$  см<sup>3</sup>/моль [9]. Молярные объемы пара на линии насыщения для температур выше 3 К были вычислены с использованием вириального разложения:  $P = RT(\rho + B\rho^2 + C\rho^3)$ , где  $B$  – и  $C$  – второй и третий вириальные коэффициенты паровой смеси, соответственно. Вычисленные значения хорошо ложатся на единую кривую с экспериментальными значениями для молярных объемов пара на линии насыщения и с молярным объемом данного раствора в критической точке.

Для раствора, содержащего 60 %  $^3\text{He}$ , критическая температура составляет  $T_{\text{кр}} = 4,1$  К, молярный объем в критической точке  $V_{\text{кр}} = 59,75$  см<sup>3</sup>/моль [9]. Молярный объем насыщенного пара при температурах 3,25 и 3,5 К определялся с использованием вириального разложения, однако для температуры 3,75 К оно дает завышенное значение молярного объема. Здесь для расчетов использовалось интерполированное значение молярного объема с учетом экспериментальной зависимости [8] молярного объема насыщенного пара этого раствора от температуры и молярного объема в критической точке.

Для раствора, содержащего 80 %  $^3\text{He}$ , критическая температура  $T_{\text{кр}} = 3,72$  К, молярный объем в критической точке  $V_{\text{кр}} = 63,65$  см<sup>3</sup>/моль. Молярные объемы для пара на линии насыщенных паров для температур выше 3 К были определены с помощью интерполяции с использованием значения молярного объема в критической точке. Вириальное разложение дает завышенное на 6 % значение молярного объема пара при 3 К. Поэтому при температурах выше 3 К пользоваться им не целесообразно. Точность определения молярного объема насыщенного пара растворов при температурах выше 3 К оценена в 3 %.

Значения термодинамических характеристик на линии насыщенных паров для трех растворов, вычисленные по формулам (3)-(6), даны в табл. 1.

В таблице верхние значения для каждой температуры соответствуют жидкости, нижние – пару. Значения молярного объема даны в см<sup>3</sup>/моль,  $S$  – в Дж/(К·моль),  $F$  и  $H$  – в Дж/моль.

Вычисленные по уравнениям (1) и (2) значения энтропии и свободной энергии жидкого раствора изотопов гелия с концентрацией 20 %  $^3\text{He}$  для заданных давлений и ряда температур, а также значения энтальпии, потенциала Гиббса и полной энергии, вычисленные с использованием термодинамических соотношений (5), даны в табл. 2; аналогичные данные для раствора, содержащего 60 %  $^3\text{He}$ , – табл. 3, а для раствора, содержащего 80 %  $^3\text{He}$ , – в табл. 4. Интервал температур и давлений для каждого раствора определялся областью, где смесь находилась в жидком состоянии. Вблизи критической области единое уравнение состояния перестает работать, что ограничивает температурный интервал таблиц.

Таблица 1  
Термодинамические параметры жидких растворов  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  с содержанием 20, 60 и 80 %  $^3\text{He}$  и соответствующие значения для равновесного пара на линии насыщения

$T, K$	20 % $^3\text{He}$				60 % $^3\text{He}$				80 % $^3\text{He}$			
	$V$	$S$	$H$	$F$	$V$	$S$	$H$	$F$	$V$	$S$	$H$	$F$
2,25	29,09	19,0	-22,4	-66,0	33,55	17,6	-12,2	-52,5	36,43	16,3	-9,5	-47,0
	1360	48,1	42,5	-81,7	696	40,8	40,1	-66,7	570	38,0	39,5	-61,0
2,50	29,41	19,6	-21,2	-70,8	34,07	19,1	-9,7	-58,0	37,29	17,7	-6,4	-51,9
	986	46,6	46,3	-87,8	520	40,0	43,0	-73,1	410	36,8	41,5	-65,8
2,75	29,81	20,3	-19,0	-75,3	34,70	20,8	-5,5	-63,6	38,38	19,4	-1,8	-57,1
	733	45,2	49,6	-93,5	394	39,1	45,5	-79,1	305	35,6	42,9	-70,8
3,00	30,28	20,8	-15,7	-79,2	35,48	22,2	0,4	-69,2	39,80	21,1	3,4	-62,7
	544	43,5	52,5	-98,2	302	38,1	47,2	-84,8	225	34,3	43,1	-75,4
3,25	30,90	21,8	-10,8	-83,3	36,63	24,4	8,0	-75,3	42,19	24,0	13,4	-68,5
	415	42,0	54,7	-102,7	225	36,8	47,1	-89,8	165	32,8	41,8	-79,4
3,50	31,66	23,1	-6,1	-87,3	38,20	26,4	15,2	-81,1	46,18	26,2	22,0	-75,0
	313	40,2	55,7	-106,3	168,7	35,3	46,3	-94,3	109	30,2	36,0	-82,2
3,75	32,62	24,9	0,9	-92,0	40,85	27,9	22,2	-87,7	-	-	-	-
	247	38,8	56,3	-110,5	121	33,2	42,0	-97,8	-	-	-	-
4,00	33,84	26,9	10,8	-96,7	44,79	28,6	24,9	-96,4	-	-	-	-
	191	37,2	55,6	-114,0	78	30,1	30,9	-101,4	-	-	-	-
4,20	35,10	28,0	18,9	-101,1	-	-	-	-	-	-	-	-
	151	35,6	52,9	-116,3	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 2

Интегральные термодинамические характеристики жидких растворов  ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$  с концентрацией 20 %  ${}^3\text{He}$   
в области гомогенного жидкого состояния  
( $T, K; S, \text{Дж}/(\text{К}\cdot\text{моль})$ ; термодинамические потенциалы,  $\text{Дж}/\text{моль}$ )

$P=0,1 \text{ МПа}$						$P=0,5 \text{ МПа}$					
$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$	$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$
2,25	18,9	-65,9	-63,0	-20,5	-23,4	2,25	18,7	-65,5	-51,9	-9,8	-23,4
2,5	19,6	-70,7	-67,8	-18,8	-21,7	2,50	19,2	-70,3	-56,6	-8,6	-22,3
2,75	20,2	-75,3	-72,4	-16,8	-19,8	2,75	19,6	-74,8	-61,0	-7,1	-20,9
3,00	20,7	-79,2	-76,2	-14,1	-17,1	3,00	20,0	-78,6	-64,6	-4,6	-18,6
3,25	21,8	-83,3	-80,2	-9,4	-12,5	3,25	20,9	-82,7	-68,6	-0,6	-14,8
3,50	23,0	-87,3	-84,2	-3,7	-6,8	3,50	22,0	-86,5	-72,1	4,9	-9,5
3,7	23,6	-90,9	-87,7	-0,3	-3,6	3,75	23,4	-91,1	-76,5	11,3	-3,4
-	-	-	-	-	-	4,00	24,8	-95,6	-80,7	18,5	3,6
-	-	-	-	-	-	4,2	25,7	-99,8	-84,6	23,4	8,1
$P=1 \text{ МПа}$						$P=2 \text{ МПа}$					
$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$	$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$
2,25	18,4	-64,5	-38,6	2,9	-23,1	2,25	18,1	-62,0	-13,5	27,2	-21,3
2,50	18,8	-69,3	-43,2	3,8	-22,3	2,50	18,4	-66,7	-18,0	28,0	-20,7
2,75	19,2	-73,8	-47,6	5,2	-21,0	2,75	18,7	-71,1	-22,2	29,2	-19,7
3,00	19,5	-77,5	-51,1	7,4	-19,0	3,00	18,9	-74,8	-25,7	31,0	-18,1
3,25	20,3	-81,4	-54,8	11,2	-15,4	3,25	19,6	-78,6	-29,3	34,4	-14,9
3,50	21,3	-85,2	-58,3	16,3	-10,7	3,50	20,4	-82,2	-32,6	38,8	-10,8
3,75	22,5	-89,6	-62,4	22,0	-5,2	3,75	21,5	-86,4	-36,4	44,2	-5,8
4,00	23,8	-94,0	-66,4	28,8	1,2	4,00	22,7	-90,5	-40,1	50,7	0,3
4,2	24,6	-98,0	-70,1	33,2	5,3	4,2	23,5	-94,3	-43,6	55,1	4,4
$P=4 \text{ МПа}$						$P=6 \text{ МПа}$					
$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$	$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$
2,25	17,5	-56,1	32,9	72,3	-16,7	2,4	17,3	-52,4	73,0	114,5	-10,9
2,50	17,8	-60,7	28,3	72,8	-16,2	2,50	17,3	-54,1	71,5	114,7	-10,9
2,75	18,0	-65,0	24,3	73,8	-15,5	2,75	17,5	-58,5	67,6	115,7	-10,4
3,00	18,2	-68,6	21,0	75,6	-14,0	3,00	17,6	-62,0	64,5	117,3	-9,2
3,25	18,8	-72,2	17,7	78,8	-11,1	3,25	18,2	-65,7	61,2	120,4	-6,6
3,50	19,5	-75,7	14,6	82,8	-7,5	3,50	18,9	-69,0	58,3	124,4	-2,9
3,75	20,5	-79,6	11,0	87,9	-2,7	3,75	19,8	-72,8	54,9	129,1	1,5
4,00	21,5	-83,5	7,5	93,5	2,5	4,00	20,8	-76,6	51,5	134,7	6,6
4,20	22,3	-87,1	4,3	97,9	6,6	4,20	21,6	-79,0	49,5	140,2	11,7
$P=8 \text{ МПа}$						$P=10 \text{ МПа}$					
$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$	$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$
2,80	17,0	-52,7	107,9	155,5	-5,1	3,25	17,3	-52,1	142,1	198,3	4,1
3,00	17,1	-55,4	105,6	156,9	-4,1	3,50	17,9	-55,4	139,4	202,1	7,3
3,25	17,7	-58,9	102,5	160,1	-1,4	3,75	18,9	-59,2	136,2	207,1	11,7
3,50	18,4	-62,2	99,7	164,1	2,2	4,00	19,8	-62,9	133,1	212,3	16,3
3,75	19,3	-66,0	96,4	168,8	6,4	4,20	20,7	-66,2	130,2	217,1	20,7
4,00	20,3	-69,7	93,2	174,4	11,5	-	-	-	-	-	-
4,20	21,1	-73,0	90,2	178,8	15,6	-	-	-	-	-	-

Таблица 3

Интегральные термодинамические характеристики жидких растворов  ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$  с концентрацией 60%  ${}^3\text{He}$  в области гомогенного жидкого состояния  
( $T, K$ ;  $S, \text{Дж}/(\text{К}\cdot\text{моль})$ ; термодинамические потенциалы,  $\text{Дж}/\text{моль}$ )

$P=0,1 \text{ МПа}$						$P=0,5 \text{ МПа}$					
$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$	$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$
2,25	17,5	-52,4	-49,1	-9,7	-13,0	2,25	17,3	-51,6	-36,5	2,4	-12,7
2,50	18,9	-58,0	-54,7	-7,5	-10,8	2,50	18,3	-57,2	-42,0	3,8	-11,5
2,75	20,6	-63,5	-60,1	-3,5	-6,9	2,75	19,7	-62,7	-47,3	6,9	-8,5
3,00	22,4	-69,2	-65,7	-2,0	-2,0	3,00	21,2	-68,1	-52,5	11,1	-4,5
3,20	23,9	-74,1	-70,5	6,0	2,4	3,25	23,1	-74,0	-58,2	16,9	1,1
-	-	-	-	-	-	3,50	25,0	-79,6	-63,5	24,0	7,9
-	-	-	-	-	-	3,75	26,2	-85,6	-69,1	29,2	12,7
$P=1 \text{ МПа}$						$P=2 \text{ МПа}$					
$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$	$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$
2,25	17,0	-50,2	-21,9	16,4	-12,0	2,25	16,6	-46,9	5,1	42,5	-9,6
2,50	17,9	-55,7	-27,3	17,5	-11,0	2,50	17,4	-52,3	-0,1	43,4	-8,8
2,75	19,2	-61,1	-32,5	20,3	-8,3	2,75	18,6	-57,6	-5,2	46,0	-6,5
3,00	20,6	-66,5	-37,6	24,2	-4,7	3,00	19,9	-62,8	-10,1	49,6	-3,1
3,25	22,3	-72,2	-43,1	29,4	0,3	3,25	21,5	-68,4	-15,4	54,4	1,5
3,50	24,0	-77,5	-48,1	35,9	6,5	3,50	23,1	-73,3	-20,0	60,8	7,6
3,75	25,1	-83,4	-53,6	40,5	10,8	3,75	24,0	-79,0	-25,3	64,7	11
$P=4 \text{ МПа}$						$P=6 \text{ МПа}$					
$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$	$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$
2,25	16,2	-39,7	54,4	90,9	-3,3	2,25	15,6	-32,0	99,9	135,0	3,1
2,50	16,8	-45,0	49,3	91,3	-3,0	2,50	16,3	-37,5	94,7	135,5	3,3
2,75	17,9	-50,2	44,4	93,6	-1,0	2,75	17,4	-42,5	90,0	137,9	5,4
3,00	19,1	-55,2	39,6	96,9	2,1	3,00	18,6	-47,5	85,4	141,2	8,3
3,25	20,6	-60,6	34,5	101,4	6,4	3,25	20,1	-52,8	80,5	145,8	12,5
3,50	22,1	-65,5	30,0	107,4	11,9	3,50	21,5	-57,6	76,0	151,3	17,7
3,75	22,8	-70,8	25,0	110,5	14,7	3,75	22,2	-62,7	71,3	154,6	20,6
$P=8 \text{ МПа}$						$P=10 \text{ МПа}$					
$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$	$T, K$	$S$	$F$	$G$	$H$	$E$
2,50	15,8	-29,8	137,6	177,1	9,7	2,85	16,9	-29,0	172,5	220,7	19,2
2,75	17,0	-34,9	133,0	179,8	11,9	3,00	17,7	-32,1	169,7	222,8	21,0
3,00	18,2	-40,2	128,1	182,7	14,4	3,25	19,3	-37,4	164,9	227,6	25,3
3,25	19,6	-45,1	123,6	187,3	18,6	3,50	20,7	-41,9	160,8	233,3	30,6
3,50	21,0	-49,7	119,4	192,9	23,8	3,75	21,3	-46,9	156,2	236,1	33,0
3,75	21,7	-54,8	114,7	196,1	26,6	-	-	-	-	-	-

На линии насыщения при  $T \leq 3 \text{ К}$  для пара значения энтропии ( $S$ ) определены с точностью 0,2 % для 20 %-го раствора и 0,3 % для 60- и 80%-го растворов; значения энтальпии ( $H$ ) определены с точностью 0,2 %. Свободная энергия ( $F$ ) пара, вычисленная из соотношения  $F = H - TS - PV$ , определена с точностью 0,3 %. При температурах выше 3 К энтропия пара определена с точностью 0,5 % для 20 %-го раствора и ~1 % для 60- и 80 %-го растворов. Энтальпия пара определена с точностью 1 % для 20 %-го раствора и 1,5 % для других растворов. Вычисленные значения свободной энергии опреде-

лены с точностью 0,7 % для 20 %-го раствора и ~1 % для 60- и 80%-го растворов.

Для жидкости на линии насыщенного пара (переход от пара к жидкости осуществлялся по уравнениям (5)) и вдоль изобар при температурах  $T \leq 3 \text{ К}$  энтропия 20 %-го раствора вычислена с точностью 0,5 %; для 60- и 80%-го растворов ~1 %; значения свободной энергии с точностью 0,5 % для 20 %-го раствора и 0,6 % для других растворов. При температурах  $T > 3 \text{ К}$  энтропия определена с точностью ~1,8 %, свободная энергия ~1 %. Значения других термодинамических величин вычислялись по формулам (5) и точность их определения зависит от точности входящих в формулы величин.

Интегральные термодинамические характеристики жидких растворов  ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$  с концентрацией 80 %  ${}^3\text{He}$  в области гомогенного жидкого состояния  
(Т, К; S, Дж/(К·моль); термодинамические потенциалы, Дж/моль)

P=0,1 МПа						P=0,5 МПа					
T, K	S	F	G	H	E	T, K	S	F	G	H	E
2,25	15,9	-46,9	-43,4	-7,6	-11,1	2,25	14,9	-46,0	-30,2	3,4	-12,5
2,5	17,4	-51,9	-48,3	-4,8	-8,4	2,50	16,4	-50,8	-34,8	6,2	-9,8
2,75	19,1	-57,0	-53,3	-0,8	-4,5	2,75	18,0	-55,7	-39,5	10,0	-6,2
3,00	20,8	-62,6	-58,7	3,7	-0,2	3,00	19,4	-61,1	-44,7	13,6	-2,9
3,10	21,9	-64,9	-61,0	6,9	3,0	3,25	21,2	-66,6	-49,9	19,0	2,3
-	-	-	-	-	-	3,50	22,3	-72,3	-55,2	22,9	5,8
P=1 МПа						P=2 МПа					
T, K	S	F	G	H	E	T, K	S	F	G	H	E
2,25	14,4	-44,4	-15,0	17,4	-12,0	2,25	13,9	-40,7	13,1	44,4	-9,4
2,50	15,9	-49,0	-19,4	20,4	-9,3	2,50	15,3	-45,2	8,8	47,0	-7,0
2,75	17,4	-53,9	-24,0	23,8	-6,1	2,75	16,7	-49,9	4,3	50,2	-4,0
3,00	18,6	-59,1	-29,0	26,8	-3,3	3,00	17,9	-54,9	-0,4	53,3	-1,2
3,25	20,3	-64,3	-33,9	32,1	1,7	3,25	19,4	-60,0	-5,2	57,8	3,1
3,50	21,2	-69,8	-39,1	35,2	4,4	3,50	20,2	-65,2	-10,1	60,6	5,5
P=4 МПа						P=6 МПа					
T, K	S	F	G	H	E	T, K	S	F	G	H	E
2,25	13,5	-32,8	63,9	94,3	-2,4	2,25	13,2	-24,7	110,5	140,2	5,0
2,50	14,7	-37,2	59,7	96,4	-0,5	2,50	14,2	-29,1	106,4	141,9	6,4
2,75	16,0	-41,7	55,5	99,5	2,3	2,75	15,5	-33,6	102,2	144,8	9,0
3,00	17,1	-46,6	50,8	102,1	4,7	3,00	16,6	-38,4	97,7	147,5	11,4
3,25	18,5	-51,5	46,2	106,3	8,6	3,25	18,0	-43,1	93,3	151,8	15,4
3,50	19,2	-56,5	41,5	108,7	10,7	3,50	18,6	-48,0	88,8	153,9	17,1
P=8 МПа						P=10 МПа					
T, K	S	F	G	H	E	T, K	S	F	G	H	E
2,30	12,8	-17,4	153,4	182,8	12,0	2,65	14,1	-15,5	189,7	227,1	21,9
2,50	13,8	-21,0	150,3	184,8	13,5	2,75	14,7	-17,2	188,2	228,6	23,2
2,75	15,1	-25,4	146,3	187,8	16,1	3,00	15,9	-22,0	183,9	231,6	25,7
3,00	16,2	-30,2	141,9	190,5	18,4	3,25	17,3	-26,7	179,7	235,9	29,5
3,25	17,6	-34,9	137,5	194,7	22,3	3,50	17,8	-31,5	175,3	237,6	30,8
3,50	18,2	-39,7	133,1	196,8	24,0	-	-	-	-	-	-

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для четырех растворов изотопов гелия с содержанием 20, 40 [1], 60 и 80 %  ${}^3\text{He}$  (для которых ранее был рассчитан ряд дифференциальных термодинамических характеристик [2]) рассчитаны: мольная энтропия, свободная энергия, потенциал Гиббса, энтальпия и полная энергия в диапазоне температур и давлений, где смеси находятся в жидком состоянии, с шагом по температуре и давлению, достаточным для линейной интерполяции.

Следует отметить, что для чистых изотопов гелия существуют подробные таблицы термодинамических величин [6,10]. Значения термодинамических величин, вычисленные нами с использованием описанной методики для  ${}^4\text{He}$ , хорошо согласуются с данными работы [6], с данными работы [10] для  ${}^3\text{He}$  имеются расхождения.

Продолжением работы может быть изучение концентрационных зависимостей и избыточных величин рассчитанных термодинамических характеристик растворов изотопов гелия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Р.М. Сибилева, Л.В. Карнацевич, М.В. Мельников, М.А. Хажмурадов. Расчет интегральных термодинамических характеристик жидких растворов изотопов гелия // *ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2009, №6, с.62-66.
2. Р.М. Сибилева, А.В. Мериуц, Л.В. Карнацевич, М.А. Хажмурадов, Э.И. Винокуров. Единое уравнение состояния и дифференциальные термодинамические характеристики жидких смесей  ${}^3\text{He}$  –  ${}^4\text{He}$  // *ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2006, №1, с. 35-139.
3. 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.
4. И.В. Богоявленский, С.И. Юрченко. Измерение молярных объемов жидких растворов  ${}^3\text{He}$  в  ${}^4\text{He}$  под давлением до 100 атмосфер при температу-

- рах 1,5-4,2 К // *Физика низких температур*. 1976, т. 2, №11, с. 1379-1387.
5. *Argon, helium and the rare gases* / Ed. Gerhard Cook. New York; London. Intersci. publ., 1961, v. 1, p. 394.
  6. R.D. McCarty. Thermodynamic Properties of Helium 4 from 2 to 1500K at Pressures to  $10^8$ Pa // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1973, v. 2, №4, p. 923-1042.
  7. Л.В. Карнацевич, И.В. Богоявленский, Л.П. Титарь. Вириальные коэффициенты изотопов гелия при низких температурах // *Физика низких температур*. 1988, т. 14, №1, с. 3-14.
  8. Б.Н. Есельсон, В.Н. Григорьев, В.Г. Иванцов, Э.Я. Рудаковский, Д.Д. Саникидзе, И.А. Сербин. *Растворы квантовых жидкостей  $^3\text{He} - ^4\text{He}$* . М.: «Наука», 1973, 423с.
  9. B. Wallace, Jr., I.Harris, Horst Meyer. Boiling and Dew Curves of  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  Mixtures // *Phys. Rev. A*. 1972, v. 5, №2, p. 964-967.
  10. И.В. Богоявленский, Л.В. Карнацевич, В.Г. Конарева. *Таблицы рекомендуемых справочных данных. Гелий 3. Термодинамические свойства*. М. ГСССД, 1988, с. 45, деп. рук.

Статья поступила в редакцию 09.07.2010 г

### ТЕРМОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РІДКИХ РОЗЧИНІВ $^3\text{He}-^4\text{He}$ З КОНЦЕНТРАЦІЯМИ 20, 60 І 80 % $^3\text{He}$

*Р.М. Сібільова, Л.В. Карнацевич, М.В. Мельников, М.А. Хажмуратов*

Проведений розрахунок інтегральних термодинамічних характеристик рідких розчинів  $^3\text{He}-^4\text{He}$  з концентраціями 20, 60 і 80 %  $^3\text{He}$  в інтервалі температур і тиску, обмежених областю, де розчин знаходиться в рідкому стані. Розраховані величини молярної ентропії, вільній енергії, ентальпії, потенціалу Гіббса і повній енергії з кроком по температурі і тиску, достатнім для лінійної інтерполяції даних. Даний розрахунок є етапом, що завершує складання таблиць термодинамічних величин для рідких розчинів ізотопів гелію.

### THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE LIQUID SOLUTIONS OF $^3\text{He}-^4\text{He}$ WITH CONCENTRATION 20, 60 AND 80 % $^3\text{He}$

*R.M. Sibilyova, L.V. Karnatsevich, M.V. Melnykov, M.A. Khazmuradov*

The calculation of integral thermodynamic characteristics of the liquid solution of  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  with concentrations 20, 60 and 80 %  $^3\text{He}$  in the interval of temperatures and pressures, where solution is in the liquid state is conducted. The molar entropy, free energy, enthalpy, Gibbs thermodynamic potential and total energy for solutions are calculated with temperature and pressure increment sufficient for linear interpolation of the data. This calculation is completion stage of the complication of tables of thermodynamic characteristics of liquid solutions of isotopes of helium.