

РАСЧЕТ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ РАСТВОРОВ ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ

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*

Описана методика расчета интегральных термодинамических характеристик жидких растворов $^3\text{He}-^4\text{He}$ на основе единого уравнения состояния, построенного авторами ранее с использованием экспериментальных данных, полученных в ИФТТМТ ННЦ ХФТИ. Для раствора с концентрацией 40% ^3He в интервале температур 2,25...4,2 К и давлений 0...10 МПа рассчитаны энтропия (S), свободная энергия (F), энтальпия (H), потенциал Гиббса (G) и полная энергия (E) с шагом по температуре и давлению, достаточным для линейного интерполирования данных. Данный расчет является этапом составления инженерных таблиц термодинамических величин для смесей $^3\text{He}-^4\text{He}$, необходимых для расчетов низкотемпературных криостатов, основанных на методе растворения ^3He в ^4He .

ВВЕДЕНИЕ

Целесообразность разработки таблиц, содержащих основные термодинамические свойства жидких растворов $^3\text{He}-^4\text{He}$, связана с широким использованием этих растворов для получения сверхнизких температур и с необходимостью соответствующих термодинамических данных для расчетов криостатов растворения [1].

Ранее нами на основании полученных в лаборатории молекулярной физики и техники низких температур ИФТТМ ННЦ ХФТИ экспериментальных $P-V-T$ данных для жидких смесей $^3\text{He}-^4\text{He}$ и чистых изотопов гелия в широкой области условий [2], а также аналогичных литературных данных для этих смесей и чистых изотопов в жидкой фазе вдоль линии насыщенных паров и вдоль линии начала затвердевания [3] была получена единая аналитическая зависимость давления (P) от температуры (T), молярного объема (V) и концентрации (x) смеси в интервале температур 2,25...4,2 К и давлений 0...10 МПа [4]. С использованием этого единого уравнения состояния $P=P(T, V, x)$ был рассчитан ряд важных термодинамических характеристик для растворов, содержащих 20, 40, 60 и 80% ^3He в интервале температур и давлений, где эти смеси находятся в жидком состоянии [5].

Развитием этой работы является расчет интегральных термодинамических характеристик жидких смесей $^3\text{He}-^4\text{He}$, таких как энтропия, энтальпия, свободная энергия и др.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСЕЙ $^3\text{He}-^4\text{He}$ В ЖИДКОЙ ФАЗЕ

В работе [5] на основании полученного уравнения состояния нами были рассчитаны: молярный объем, плотность, изобарический коэффициент теплового расширения, изотермический коэффициент сжимаемости и фактор сжимаемости для четырех

жидких смесей $^3\text{He}-^4\text{He}$ с шагом по температуре и давлению, достаточным для линейного интерполирования. Расчет интегральных характеристик достаточно трудоемкая задача. В качестве первого объекта для отработки методики расчета мы выбрали смесь $^3\text{He}-^4\text{He}$ с концентрацией 40% ^3He .

Уравнение состояния позволяет определить изменение интегральных термодинамических характеристик системы при изменении ее состояния. Для расчета абсолютных значений этих величин необходимо выбрать определенное стандартное состояние и определить соответствующие свойства в этом состоянии. В качестве стандартного состояния была выбрана газообразная смесь $^3\text{He}-^4\text{He}$ при $P_0=0,1013$ МПа и $T_0=60$ К. Энтропия и свободная энергия в этой точке могут быть вычислены по формулам идеального газа [6]:

$$S_0 = 2,5R + 1,5R \ln M + 2,5R \ln T_0 - 2,2897R - R \ln P_0 (\text{МПа}) - 30,472072 + S_{spin} + S_{mix}, \quad (1)$$

где S_0 – энтропия стандартного состояния; M – молекулярная масса; S_{spin} и S_{mix} – вклад в энтропию, определяемый наличием спина частиц и факта смешения двух чистых веществ.

$$S_{mix} = -R(x \ln x + (1-x) \ln(1-x)),$$

$$S_{spin} = R(x \ln(2s_1 + 1) + (1-x) \ln(2s_2 + 1)).$$

Для ^3He спин $s_1=1/2$, для ^4He спин $s_2=0$. Значение S_0 для смеси зависит не только от параметров стандартного состояния T_0 и P_0 , но и от концентрации газообразной смеси, так как M – молекулярная масса, S_{spin} и S_{mix} являются функциями концентрации.

Первым шагом при проведении расчетов термодинамических величин в жидкости является определение термодинамических характеристик для паровых растворов на линии насыщенных паров для ряда рассматриваемых температур. Концентрация пара над жидкостью определенной концентрации на линии насыщенных паров зависит от температуры [7]. Поэтому для каждой температуры, для которой производился расчет термодинамических величин, сле-

довало определить значение энтропии в стандартном состоянии. Значения равновесной концентрации паров над жидкостью с концентрацией 40% на линии насыщенных паров в зависимости от температуры определялись с использованием работ [7-9]. Сглаженные значения этих величин приведены в табл. 1. Вычисленные по уравнению (1) значения энтропии в стандартном состоянии в зависимости от температуры также приведены в табл.1. Энтальпия (H_0) стандартного состояния является функцией только T_0 , а именно: $H_0 = 2,5RT_0$. Для определения энтропии и энтальпии пара на линии насыщенного пара использовались известные термодинамические формулы (см., например, работу Мак-Карти [10], в которой определялись термодинамические характеристики чистого ^4He):

$$S(T) = S_0 - R \ln \left(\frac{\rho RT}{P_0} \right) + \int_{\rho_0}^{\rho} \left[\frac{R}{\rho} - \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\rho} \right] d\rho + \int_{T_0}^T c_p^0 \frac{dT}{T};$$

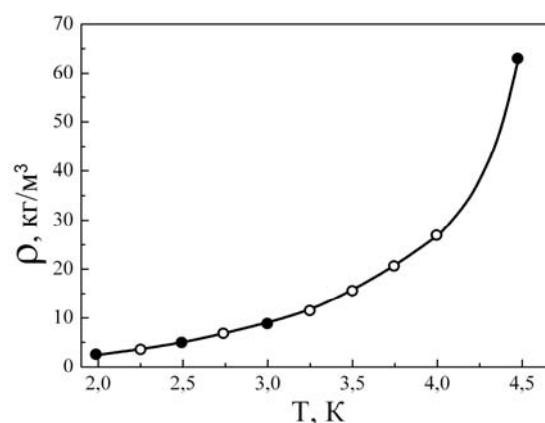
$$H(T) = H_0 + \int_{\rho_0}^{\rho} \left[\frac{P}{\rho^2} - \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\rho} \right] d\rho + \frac{P}{\rho} - RT + \int_{T_0}^T c_p^0 dT. \quad (2)$$

Здесь $c_p^0 = 2,5 \cdot R$; ρ_0 – плотность идеального газа в стандартном состоянии, $\rho_0 = P_0/RT_0$; ρ – плотность пара на линии насыщения. Для вычисления величин $S(T)$ и $H(T)$ необходимо знать значения плотности пара на линии насыщенных паров и зависимость $P = P(T, \rho)$ для газообразных смесей различной концентрации. Экспериментальные значения плотности насыщенного пара для смесей 20, 40, 60 и 80% ^3He при $T = 2; 2,5; 3$ К приведены в работе [9]. Экспериментальных данных для зависимости $P(T, \rho)$ для смесей не имеется. Анализ показал, что имеющиеся экспериментальные данные для плотности насыщенного пара смесей, хорошо описываются уравнением:

$$P = RT(\rho + B\rho^2 + C\rho^3), \quad (3)$$

где B и C – второй и третий вириальные коэффициенты смесей, полученные аддитивным образом из соответствующих коэффициентов чистых компонент.

Температурные зависимости для второго и третьего вириальных коэффициентов ^3He и ^4He взяты из работ [10,11]. Для жидкой смеси изотопов гелия с концентрацией 40% ^3He значения плотности насыщенного пара для температур 2,25...3 К были взяты из экспериментальной работы [9], для температур 3,25...4,0 К они были определены из уравнения (3). На рисунке показана зависимость от температуры плотности насыщенного пара для жидкой смеси с концентрацией 40% ^3He . Показана также критическая точка смеси с концентрацией 40% ^3He : $T_{кр} = 4,487$ К; $P_{кр} = 0,1874$ МПа; $V_{кр} = 57,65$ см³/моль [8]. Видно, что вычисленные и экспериментальные значения хорошо ложатся на единую кривую, определено значение плотности пара на линии насыщения при $T = 4,2$ К.



Зависимость плотности насыщенного пара для жидкой смеси с концентрацией 40% ^3He от температуры; ● – экспериментальные значения, ○ – вычисленные значения

Из уравнений (2) и (3) для энтропии пара на линии насыщения:

$$S_n(T) = S_0 - R \cdot \ln \left(\frac{\rho RT}{P_0} \right) + R \cdot \left(B + T \frac{dB}{dT} \right) \cdot (\rho_0 - \rho) + \frac{R}{2} \cdot \left(C + T \frac{dC}{dT} \right) \cdot (\rho_0^2 - \rho^2) + 2,5 \cdot R \cdot \ln \frac{T}{T_0}. \quad (4)$$

Для энтальпии пара на линии насыщения получаем:

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

Здесь ρ – плотность пара на линии насыщения, $\rho = 1/V$.

Термодинамические потенциалы: энтальпия (H), свободная энергия (F), потенциал Гиббса (G), внутренняя энергия (E) и энтропия (S) связаны известными термодинамическими соотношениями:

$$H = G + TS, \quad F = G - PV, \quad E = G - PV + TS. \quad (6)$$

Для жидкости на линии насыщенных паров величины свободной энергии ($F_{ж}$) и энтропии ($S_{ж}$) связаны с соответствующими величинами для пара на линии насыщения соотношениями:

$$S_{ж}(T) = S_n(T) - \Delta H / T; \quad (7)$$

$$F_{ж}(T) = F_n + P_{у.н.} \cdot \Delta V.$$

Здесь ΔH – теплота испарения жидкого раствора; ΔV – скачок молярного объема при переходе из пара в жидкость; $P_{у.н.}$ – давление на линии насыщения, соответствующее данной температуре.

Зависимость теплоты испарения жидких растворов ^3He - ^4He от температуры определена в работе [12]. Используя результаты этой работы, аддитивный характер зависимости $\Delta H(x)$ и используя данные для теплоты испарения чистых ^3He и ^4He [13,14], а также данные о молярном объеме жидких смесей на линии насыщения, можно рассчитать энтропию и свободную энергию жидкости на линии насыщения.

В табл. 1 приведены значения молярного объема V , энтропии S , свободной энергии F , энтальпии H , потенциала Гиббса G и полной энергии E для 40% жидкой смеси на линии насыщения для жидкости и пара.

Таблица 1

Термодинамические параметры жидкого раствора ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ с концентрацией 40% ${}^3\text{He}$ и соответствующие значения для равновесного пара на линии насыщенных паров

| T, K | P, кПа | x, % пар | V, см ³ /моль Жидкость, пар | S, Дж/К жидкость, пар | F, Дж Жид- кость, пар | H, Дж Жидкость, пар | E, Дж Жид- кость, пар | G, Дж |
|------|--------|----------|--|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------|
| 2,25 | 16,57 | 76 | 30,93 914 | 18,8 44,04 | -58,7 -73,4 | -15,9 40,87 | -16,4 25,7 | -58,2 |
| 2,50 | 24,73 | 72 | 31,32 676 | 20,1 43,08 | -64,0 -79,9 | -13,0 44,53 | -13,8 27,8 | -63,2 |
| 2,75 | 35,21 | 68 | 31,84 500 | 21,2 41,89 | -69,3 -85,8 | -9,9 47,05 | -11,0 29,4 | -68,2 |
| 3,00 | 48,00 | 64 | 32,45 383 | 22,5 40,82 | -74,8 -91,6 | -5,7 49,21 | -7,3 30,9 | -73,2 |
| 3,25 | 64,99 | 60 | 33,27 297 | 24,5 39,7 | -80,1 -97,2 | 1,7 51,1 | -0,5 31 | -77,9 |
| 3,50 | 85,61 | 56 | 34,32 222 | 26,5 38,1 | -85,5 -101,5 | 10,2 50,7 | 6 32 | -82,6 |
| 3,75 | 108,87 | 53 | 35,68 168 | 28,0 36,4 | -91,3 -105,7 | 15,7 49,2 | 12 31 | -87,4 |
| 4,00 | 133,30 | 50 | 37,62 131 | 29,5 34,9 | -97,7 -110,1 | 23,3 46,8 | 18 30 | -92,7 |
| 4,20 | 154,68 | 48 | 39,88 100 | 30,0 33,2 | -103,3 -112,6 | 28,9 41,1 | 23 27 | -97,1 |

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИ- СТИКИ ДЛЯ ЖИДКИХ РАСТВОРОВ ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ 40% ${}^3\text{He}$

Теперь значения S и F в жидкой фазе вдоль изотерм можно вычислить по формулам:

$$F(T) = F_{y.n.} + \int_{\rho_{y.n.}}^{\rho} \frac{P(\rho)}{\rho^2} \cdot d\rho; \quad (8)$$

$$S(T) = S_{y.n.} - \int_{P_{y.n.}}^P \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \cdot dP,$$

где $F_{y.n.}$, $S_{y.n.}$, $P_{y.n.}$, $\rho_{y.n.}$ - значения соответствующих величин в жидкости на линии насыщенного пара. Единое уравнение состояния для жидких смесей ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$, полученное нами в работе [4], имеет вид:

$$P(\rho) = \sum_{i=1}^4 \left(10^{2i+5} \sum_{j=1}^6 c_{ij} T^{j-1} \right) \cdot \rho^{i+2} +$$

$$+ x \cdot \sum_{i=1}^4 \left(10^{2i+5} \sum_{j=1}^6 n_{ij} T^{j-1} \right) \cdot \rho^{i+2}. \quad (9)$$

Подгоночные коэффициенты уравнения c_{ij} и n_{ij} приведены в работе [4]. При вычислении энтропии удобно перейти к интегрированию по молярному объему.

$$S(T) = S_{y.n.} + \int_{V_{y.n.}}^V \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \cdot dV. \quad (10)$$

Учитывая (9), формулы для вычисления энтропии и свободной энергии в жидкой фазе приобретают вид:

$$S = S_{y.n.} -$$

$$\sum_{i=1}^4 \frac{10^{2i+5}}{i+1} (\rho^{i+1} - \rho_{y.n.}^{i+1}) \sum_{j=2}^6 (j-1) T^{j-2} (c_{ij} + x n_{ij}); \quad (11)$$

$$F = F_{y.n.} +$$

$$\sum_{i=1}^4 \frac{10^{2i+5}}{i+1} (\rho^{i+1} - \rho_{y.n.}^{i+1}) \sum_{j=1}^6 T^{j-1} (c_{ij} + x n_{ij}). \quad (12)$$

Вычисленные по уравнениям (11) и (12) значения энтропии и свободной энергии жидкой смеси изотопов гелия с концентрацией 40% ${}^3\text{He}$ для заданных давлений и ряда температур, а также зна-

чения энтальпии, потенциала Гиббса и полной энергии, вычисленные с использованием соотно-

шений (6), даны в табл. 2.

Таблица 2

Интегральные термодинамические характеристики жидких растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ с концентрацией 40% ${}^3\text{He}$ в области гомогенного жидкого состояния (Т в К; S, Дж/К; термодинамические потенциалы, Дж).

| P=0,1 МПа | | | | | | P=0,5 МПа | | | | | |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-----------|------|--------|-------|-------|-------|
| T | S | F | G | H | E | T | S | F | G | H | E |
| 2.25 | 18.8 | -58.7 | -55.6 | -13.3 | -16.4 | 2.25 | 18.7 | -58.1 | -43.8 | -1.7 | -16.0 |
| 2.50 | 20.1 | -63.9 | -60.8 | -10.5 | -13.7 | 2.50 | 19.6 | -63.3 | -48.9 | 0.1 | -14.3 |
| 2.75 | 21.1 | -69.3 | -66.1 | -8.1 | -11.3 | 2.75 | 20.4 | -68.6 | -54.0 | 2.1 | -12.5 |
| 3.00 | 22.5 | -74.8 | -71.6 | -4.1 | -7.3 | 3.00 | 21.6 | -74.0 | -59.2 | 5.6 | -9.2 |
| 3.25 | 24.5 | -80.1 | -76.8 | 2.9 | -0.5 | 3.25 | 23.4 | -79.2 | -64.2 | 11.8 | -3.2 |
| 3.50 | 26.6 | -85.5 | -82.0 | 11.1 | 7.6 | 3.50 | 25.2 | -84.4 | -69.2 | 19.0 | 3.8 |
| | | | | | | 3.75 | 26.4 | -90.0 | -74.5 | 24.5 | 9.0 |
| | | | | | | 4.00 | 27.5 | -96.1 | -80.2 | 29.8 | 13.4 |
| | | | | | | 4.20 | 28.4 | -101.2 | -85.0 | 34.3 | 18.1 |
| P=1 МПа | | | | | | P=2 МПа | | | | | |
| T | S | F | G | H | E | T | S | F | G | H | E |
| 2.25 | 18.4 | -57.0 | -29.9 | 11.5 | -15.6 | 2.25 | 18.0 | -54.1 | -3.8 | 36.7 | -13.6 |
| 2.50 | 19.2 | -62.1 | -34.9 | 13.1 | -14.1 | 2.50 | 18.7 | -59.2 | -8.7 | 38.0 | -12.5 |
| 2.75 | 19.9 | -67.3 | -39.9 | 14.8 | -12.6 | 2.75 | 19.4 | -64.3 | -13.7 | 39.7 | -11.0 |
| 3.00 | 21.0 | -72.7 | -45.1 | 17.9 | -9.7 | 3.00 | 20.3 | -69.5 | -18.6 | 42.3 | -8.6 |
| 3.25 | 22.7 | -77.7 | -49.8 | 23.9 | -3.9 | 3.25 | 21.9 | -74.4 | -23.3 | 47.9 | -3.2 |
| 3.50 | 24.4 | -82.8 | -54.6 | 30.8 | 2.6 | 3.50 | 22.9 | -79.2 | -27.7 | 52.5 | 1.0 |
| 3.75 | 25.4 | -88.2 | -59.7 | 35.6 | 7.1 | 3.75 | 23.9 | -84.4 | -32.6 | 57.0 | 5.2 |
| 4.00 | 26.3 | -94.0 | -65.1 | 40.1 | 11.2 | 4.00 | 24.6 | -90.0 | -37.8 | 60.6 | 8.4 |
| 4.20 | 27.0 | -98.9 | -69.6 | 43.8 | 14.5 | 4.20 | 25.9 | -94.7 | -42.1 | 66.7 | 14.1 |
| P=4 МПа | | | | | | P=6 МПа | | | | | |
| T | S | F | G | H | E | T | S | F | G | H | E |
| 2.25 | 17.6 | -47.5 | 44.0 | 83.6 | -7.9 | 2.25 | 17.2 | -40.4 | 88.1 | 126.8 | -1.7 |
| 2.50 | 18.1 | -52.5 | 39.2 | 84.5 | -7.3 | 2.50 | 17.7 | -45.5 | 83.4 | 127.7 | -1.3 |
| 2.75 | 18.7 | -57.5 | 34.4 | 85.8 | -6.1 | 2.75 | 18.2 | -50.4 | 78.9 | 129.0 | -0.4 |
| 3.00 | 19.6 | -62.6 | 29.6 | 88.4 | -3.8 | 3.00 | 19.0 | -55.5 | 74.2 | 131.2 | 1.5 |
| 3.25 | 21.1 | -67.3 | 25.2 | 93.8 | 1.3 | 3.25 | 20.5 | -60.1 | 69.9 | 136.5 | 6.5 |
| 3.50 | 22.4 | -72.0 | 20.9 | 99.3 | 6.4 | 3.50 | 21.9 | -64.7 | 65.7 | 142.4 | 12.0 |
| 3.75 | 23.3 | -76.9 | 16.3 | 103.7 | 10.5 | 3.75 | 22.6 | -69.5 | 61.3 | 146.1 | 15.3 |
| 4.00 | 23.9 | -82.1 | 11.5 | 107.1 | 13.5 | 4.00 | 23.2 | -74.6 | 56.6 | 149.4 | 18.2 |
| 4.20 | 24.7 | -86.6 | 7.4 | 111.1 | 17.1 | 4.20 | 23.9 | -78.9 | 52.7 | 153.1 | 21.5 |
| P=8 МПа | | | | | | P=10 МПа | | | | | |
| T | S | F | G | H | E | T | S | F | G | H | E |
| 2.65 | 17.4 | -41.2 | 122.7 | 168.8 | 4.9 | 3.05 | 18.3 | -42.0 | 155.8 | 211.6 | 13.8 |
| 2.75 | 17.7 | -43.3 | 120.9 | 169.6 | 5.4 | 3.25 | 19.7 | -45.6 | 152.6 | 216.6 | 18.4 |
| 3.00 | 18.6 | -48.3 | 116.3 | 172.1 | 7.5 | 3.50 | 20.9 | -50.1 | 148.6 | 221.8 | 23.1 |
| 3.25 | 20.1 | -52.9 | 112.1 | 177.4 | 12.4 | 3.75 | 21.7 | -54.8 | 144.4 | 225.8 | 26.6 |
| 3.50 | 21.4 | -57.3 | 108.1 | 183.0 | 17.6 | 4.00 | 22.3 | -59.7 | 140.0 | 229.2 | 29.5 |
| 3.75 | 22.2 | -62.1 | 103.8 | 187.1 | 21.2 | 4.20 | 22.8 | -63.8 | 136.3 | 232.1 | 32.0 |
| 4.00 | 22.7 | -67.0 | 99.3 | 190.1 | 23.8 | | | | | | |
| 4.20 | 23.3 | -71.3 | 95.4 | 193.3 | 26.6 | | | | | | |

На линии насыщенных паров при $T \leq 3$ К для пара S и H определены с точностью 0,2% F, G и E, вычисленные по соотношениям (6), - 0,3; 0,5 и 1,5% соответственно. При $T > 3$ К точность определения величин уменьшается и составляет 0,5% для S, 1% для H, для F, G и E соответственно, 1,5; 2 и 5%. Для жидкости на линии насыщенного пара и вдоль изотерм при $T \leq 3$ К S, F и G определены с точностью 0,5%, H - $\pm 0,5$ Дж, E - $\pm 0,6$ Дж. При $T > 3$ К точности составляют 1,5% для S, 2% для F и G. H и E определены с точностью ± 2 Дж.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ранее на основании единого уравнения состояния жидких смесей ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ нами был рассчитан ряд дифференциальных термодинамических характеристик четырех жидких смесей ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$. В настоящей работе с использованием этого уравнения были рассчитаны интегральные характеристики одной из рассмотренных смесей (40% ${}^3\text{He}$) в интервале температур 2,25...4,2 К и давлений

0...10 МПа: энтропия, энтальпия, свободная энергия, потенциал Гиббса, полная энергия.

Дальнейшим направлением работы является расчет интегральных характеристик для всего интервала концентраций растворов изотопов гелия и составление соответствующих инженерных таблиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. О.В. Лоунаспаа. *Принципы и методы получения температур ниже 1 К*. М.: «Мир», 1977, с.30-78.
2. И.В. Богоявленский, С.И. Юрченко. Измерение молярных объемов жидких растворов ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ под давлением до 100 атмосфер при температурах 1,5-4,2 К // *Физика низких температур*. 1976, т.2, №11, с.1379-1387.
3. 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.
4. 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.
5. 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.135-139.

6. *Argon, helium and the rare gases* / Ed. Gerhard Coon. New York; London. Intersci. publ. 1961, v.1, p.394.

7. Б.Н. Есельсон, Н.Г. Березняк. Диаграмма состояния жидкость-пар системы изотопов гелия (${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$) // *ЖЭТФ*. 1956, т.30, №4, с.628-639.

8. B. Wallace, Jr., Horst Meyer. Pressure – Density – Temperature Relations of ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ Mixtures near the Liquid – Vapor Critical Point // *Phys. Rev. A*. 1972, v.5, №2, p. 953-964.

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. R.D. McCarty. Thermodynamic Properties of Helium 4 from 2 to 1500 K at Pressures to 10^8 Pa // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1973, v.2, №4, p.923-1042.

11. 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.

12. Б.Н. Есельсон, М.И. Каганов, И.М. Лифшиц. Термодинамика фазового перехода HeI-HeII в растворах изотопов гелия // *ЖЭТФ*. 1957, т.33, №4, с.936 – 944.

13. Б.Н. Есельсон, В.Н. Григорьев, В.Н. Иванцов, Э.Я. Рудаковский. *Свойства жидкого и твердого гелия*. М.: Издательство стандартов, 1978, с.128.

14. E.C. Kerr. Orthobaric densities of ${}^3\text{He}$ from 1,3 K to 3,2 K // *Phys. Rev.* 1954, v.96, №3, p.551-554.

Статья поступила в редакцию 23.07.2009 г.

РОЗРАХУНОК ІНТЕГРАЛЬНИХ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РІДКИХ РОЗЧИНІВ ІЗОТОПІВ ГЕЛІЮ

Р.М. Сібільова, Л.В. Карнацевич, М.В. Мельников, М.А. Хажмурадов

Описана методика розрахунку інтегральних термодинамічних характеристик рідких розчинів ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ на основі єдиного рівняння стану, побудованого авторами з використанням експериментальних даних, отриманих в ІФТТМТ ННЦ ХФТІ. Для розчину з концентрацією 40% ${}^3\text{He}$ в інтервалі температур 2,25...4,2 К та тисків 0...10 МПа розраховані ентропія (S), вільна енергія (F), ентальпія (H), потенціал Гіббса (G) та повна енергія (E) з кроком по температурі і тиску, достатнім для лінійної інтерполяції даних. Цей розрахунок є етапом складання інженерних таблиць термодинамічних величин розчинів ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$, необхідних для розрахунків низькотемпературних кріостатів, заснованих на методі розчинення ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$.

CALCULATION OF INTEGRAL THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE LIQUID SOLUTIONS OF ISOTOPES OF HELIUM

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

The method for calculation of integral thermodynamic characteristics of the liquid solutions of ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ basing on common equation of state built on basis of obtained at NSC KIPT experimental data is described. Entropy (S), free energy (F), enthalpy (H), Gibbs thermodynamic potential (G) and total energy (E) for solution with concentration 40% ${}^3\text{He}$ for the temperatures 2,25...4,2 K and pressures 0...10 MPa are calculated with temperature and pressure increment sufficient for linear interpolation of the data. This calculation is the stage of the complication of engineering tables of thermodynamic characteristics of liquid ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ solutions that have a great value for thermal calculations of the low-temperature cryostats, basing on the method of ${}^3\text{He}$ dissolving in ${}^4\text{He}$.