

О влиянии малых примесей ^4He на кривую плавления ^3He

А. Н. Ганьшин, В. Н. Григорьев, В. А. Майданов, А. А. Пензев,
Э. Я. Рудаковский, А. С. Рыбалко, Е. В. Сырников

*Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины,
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: rudavskii@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 9 января 2001 г.

В области температур 20–600 мК измерена кривая плавления ^3He , содержащего небольшие примеси ^4He . Показано, что в этом случае изменяются координаты минимума кривой плавления, появляется гистерезис и при низких температурах изменяется наклон кривой плавления. Полученные данные согласуются с расчетом, учитывающим изменение координат минимума за счет энтропии смешения раствора ^3He – ^4He . Результаты эксперимента используются для оценки погрешности в определении температуры с помощью кривой плавления ^3He .

В області температур 20–600 мК виміряно криву плавлення ^3He , утримуючого невеликі домішки ^4He . Показано, що в цьому випадку змінюються координати мінімуму кривої плавлення, з'являється гистерезис і при низьких температурах змінюється нахил кривої плавлення. Отримані дані погодяться з розрахунком, що враховує зміну координат мінімуму за рахунок ентропії змішання розчину ^3He – ^4He . Результати експерименту використовуються для оцінки похибки у визначенні температури за допомогою кривої плавлення ^3He .

PACS: 67.80.Gb, 65.70.Kb

В последнее время в практике лабораторных физических исследований в милликельвиновой области температур большое распространение получили термометры, основанные на измерении кривой плавления ^3He . Идея использовать кривую плавления ^3He как чувствительный термометр для сверхнизких температур принадлежит Скрибнеру и Адамсу [1], которые заметили, что соотношение между давлением при плавлении ^3He и температурой является универсальным и может быть измерено с высокой точностью. Страти и Адамс [2] развили технику точного измерения давления при низких температурах с помощью емкостного мембранного датчика, различные модификации которого широко используются для термометрии по кривой плавления ^3He .

Важным достоинством термометров, основанных на измерении кривой плавления ^3He (кристаллизационных термометров), является наличие трех надежных реперных точек на кривой плавления: четкого минимума, точки перехода нормального ^3He в сверхтекучую А-фазу и точки перехода

твердого ^3He в магнитное упорядоченное состояние. В настоящее время все особые точки на кривой плавления ^3He хорошо определены, согласованы между собой и фактически являются стандартом температуры в диапазоне от 1 мК до 1 К [3,4].

Несмотря на широкое применение кристаллизационных термометров, до сих пор оставался невыясненным вопрос о возможном влиянии примесей ^4He на кривую плавления ^3He . Этот вопрос является особенно актуальным, так как ^3He «коммерческой чистоты» обычно содержит 0,2–0,6% ^4He . В работе [5] была сделана оценка влияния примесей ^4He на координаты минимума кривой плавления ^3He . Автор предположил, что основную роль в изменении положения минимума, возникающего, как известно, при равенстве энтропий жидкости и кристалла, играет энтропия смешения раствора. Однако из-за отсутствия экспериментальных данных проверка этих оценок не проводилась. Кривые затвердевания растворов ^3He – ^4He хорошо изучены лишь при больших

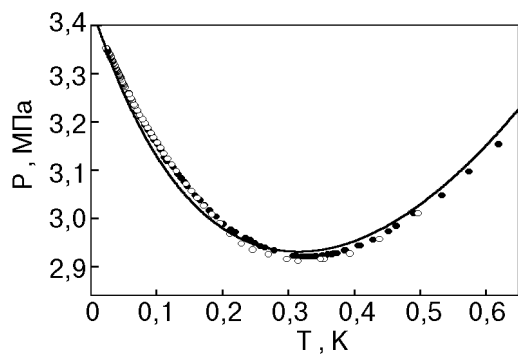


Рис. 1. Кривая плавления раствора ^3He - ^4He , содержащего 2,1% ^4He : \circ — охлаждение, \bullet — отогрев. Сплошная линия соответствует кривой плавления чистого ^3He [3].

концентрациях ^4He (10–100%) и в области высоких температур до 0,3 К [6–8].

В области концентраций примесей 1–2% должны проявляться заметные эффекты в милликельвиновом диапазоне температур, поскольку, с одной стороны, должно происходить расслоение как твердого, так и жидкого растворов, а с другой — давление затвердевания и давление плавления для твердых растворов не совпадают. Поэтому представлялось интересным и целесообразным на примере ^3He с небольшими примесями ^4He проверить, насколько сильно малые примеси ^4He деформируют кривую плавления ^3He в милликельвиновом диапазоне температур.

В эксперименте использовались два кристаллизационных термометра, которые располагались на одной и той же медной плите камеры растворения. В одном термометре в качестве рабочего вещества использовался чистый ^3He (степень чистоты составляла 99,99%), а в другом — ^3He , содержащий в газовой фазе $\sim 2,1\%$ ^4He .

Низкотемпературная часть экспериментального устройства, используемого в данной работе, подробно описана в [6]. Изменение давления проводилось емкостным мостом General Radio 1615-A, а температура определялась по давлению плавления чистого ^3He с использованием полинома, предложенного в [3]. На плите камеры растворения располагались также несколько термометров сопротивления, которые были прокалиброваны с помощью кристаллизационного термометра. Исследованный температурный диапазон составил 20–700 мК.

После блокировки капилляров кристаллизационных термометров с чистым ^3He и раствором, содержащим 2,1% ^4He , проводилось понижение температуры небольшими ступеньками, включалась система термостабилизации и измерялось равновесное давление в каждом датчике. Время выдержки на каждой температурной ступеньке

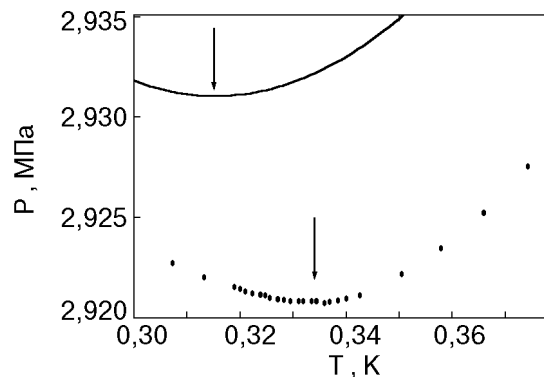


Рис. 2. Кривая плавления в области минимума: точки получены при отогреве раствора с 2,1% ^4He , кривая — чистый ^3He .

составляло 40–60 мин. Измерения проводились как при охлаждении, так и при отогреве. Результаты приведены на рис. 1.

Отчетливо видно, что кривая плавления—затвердевания для ^3He с примесями ^4He имеет ряд существенных особенностей по сравнению с кривой плавления чистого ^3He :

- данные, полученные при охлаждении, заметно отличаются от результатов измерения давления при отогреве в диапазоне 180–480 мК; максимальное расхождение наблюдается в районе минимума — около 0,1 атм. Это связано с тем, что, как уже указывалось, в растворах давление плавления не совпадает с давлением затвердевания;

- давление, при котором наблюдается минимум кривых плавления—затвердевания раствора, гораздо ниже, чем для чистого ^3He ;

- положение минимума заметно смещено в сторону высоких температур;

- при низких температурах наклон кривой плавления раствора начинает заметно изменяться по сравнению с чистым ^3He .

Для более точного определения положения минимума на рис. 2 в увеличенном масштабе приведены результаты измерений для чистого ^3He и раствора в области минимума. Минимум на кривой плавления раствора наблюдается при $T = 333$ мК, что существенно выше, чем для чистого ^3He (315 мК), т. е. температура минимума для исследованного раствора на 18 мК смещается в сторону более высоких температур, а давление в точке минимума на $\sim 10^4$ Па ниже по сравнению с P_{min} чистого ^3He . Полученные результаты можно сопоставить с оценками влияния примесей ^4He на положение минимума кривой плавления ^3He , сделанными в работе [5], где понижение

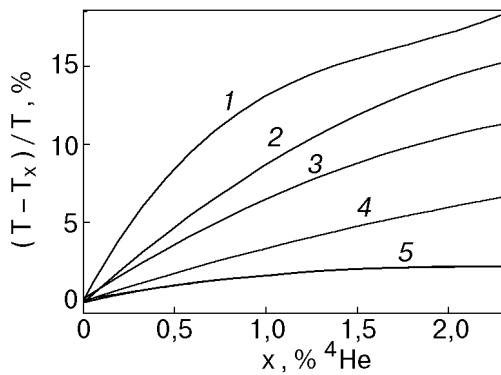


Рис. 3. Относительная ошибка в измерении температуры с помощью кривой плавления ^3He , содержащего ^4He с концентрацией x при $T = 60$ (1), 100 (2), 200 (3), 300 (4), 400 (5) мК.

давления за счет изменения энтропии смешения составляет

$$\Delta P_{\min} = \alpha x T. \quad (1)$$

Здесь x — концентрация ^4He , $\alpha = 7 \cdot 10^6$ Па/К, T — температура, а соответствующее изменение температуры минимума

$$T'_{\min} = T_{\min} + \alpha x / 2b, \quad (2)$$

где $b = 3,8 \cdot 10^6$ Па/К². Оценки по формулам (1) и (2) для исследованного раствора дают $\Delta P_{\min} = 4 \cdot 10^4$ Па, $\Delta T_{\min} = 18$ мК, что согласуется с полученными экспериментальными данными.

Таким образом, наличие в ^3He примесей ^4He (с концентрацией x) приводит к тому, что измеренная температура T_x не соответствует реальной температуре T на величину $\Delta = T - T_x$. Полученная за счет этого относительная ошибка в определении температуры приведена на рис. 3. При этом предполагалось, что в соответствии с формулами (1),(2) смещение координат минимума ΔP_{\min} и ΔT_{\min} для раствора относительно чистого ^3He пропорционально концентрации ^4He . Учитывалось также отклонение кривой плавления рас-

твора от кривой плавления чистого ^3He во всем интервале температур. Рисунок 3 может быть полезен для оценки погрешности в определении температуры с помощью кристаллизационного термометра, если рабочее вещество содержит примеси ^4He .

1. A. A. Scribner and E. D. Adams, *Rev. Sci. Instr.* **41**, 287 (1970).
2. G. C. Straty and E. D. Adams, *Rev. Sci. Instr.* **40**, 1393 (1969).
3. G. Schuster, A. Hoffmann, and D. Hechtfisher, *Comite Consultatif de Thermometrie, Toward an International Temperature Scale from 0.65 K to 1 mK*, Leiden (1998), p. 27.
4. J. S. Xia, E. D. Adams, and W. Ni, *Comite Consultatif de Thermometrie, Toward an International Temperature Scale from 0.65 K to 1 mK*, Leiden (1998), p. 21.
5. J. Bremer, *Noise Thermometry and the ^3He Melting Curve Below 1 K*, Thesis PhD, Leiden (1992).
6. К. Н. Зиновьева, *ЖЭТФ* **44**, 1837 (1963).
7. C. Le Pair, K. W. Taconis, R. De Bruyn Ouboter, P. Das, and E. Delong, *Physica* **31**, 764 (1965).
8. P. H. Tedrow and D. H. Lee, *Phys. Rev.* **181**, 399 (1969).
9. А. Н. Ганшин, В. Н. Григорьев, В. А. Майданов, Н. Ф. Омелаенко, А. А. Пензев, Э. Я. Рудавский, А. С. Рыбалко, Ю. А. Токарь, *ФНТ* **25**, 796 (1998).

On the influence of low ^4He impurity content on the melting curve of ^3He

A. N. Ganshin, V. N. Grigor'ev, V. A. Maidanov, A. A. Penzev, E. Ya. Rudavskii, A. S. Rybalko, and E. V. Syrnikov

The melting curve of ^3He with a low ^4He impurity content was measured in a temperature range of 20–600 mK. In this case there are a shift in the minimum coordinates of the melting curve, a hysteresis, and a change in the slope of the melting curve at low temperatures. The data obtained are in good agreement with the estimation considering the shift of the minimum coordinates due to the change in the entropy on mixing. The experimental results were used to estimate an error in the temperature determination with the melting curve thermometer.