

## Связь градиентов температуры и концентрации в сверхтекучих растворах ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$

А.А. Задорожко, Т.В. Калько, Э.Я. Рудавский, В.К. Чаговец, Г.А. Шешин

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

Статья поступила в редакцию 17 октября 2002 г.

В интервале  $T = 70\text{--}500$  мК измерены стационарные градиенты температуры  $\nabla T$  и концентрации  $\nabla x$ , созданные с помощью теплового потока, в сверхтекучем растворе  ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$  с исходной концентрацией 9,8 %  ${}^3\text{He}$ . Установлено, что наблюдаемое в эксперименте отношение  $\nabla x/\nabla T$  может быть описано на основе зависимости осмотического давления раствора от температуры и концентрации. Полученные данные позволили найти термодиффузионное отношение раствора, определяющее коэффициент термодиффузии.

В інтервалі  $T = 70\text{--}500$  мК виміряно стаціонарні градієнти температури  $\nabla T$  і концентрації  $\nabla x$ , що створені за допомогою теплового потоку, в надплинному розчині  ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$  з вихідною концентрацією 9,8 %  ${}^3\text{He}$ . Виявлено, що відношення  $\nabla x/\nabla T$ , що спостерігається в експерименті, може бути описано на основі залежності осмотичного тиску розчину від температури та концентрації. Отримані дані дозволили знайти термодифузійне відношення розчину, що визначає коефіцієнт термодифузії.

PACS: 67.60.-g, 64.75.+g

### 1. Введение

Одной из особенностей сверхтекучих растворов  ${}^3\text{He}$  в  ${}^4\text{He}$ , отличающей их от чистого  $\text{He II}$ , является возможность одновременного создания градиентов температуры и концентрации при постоянном давлении. В чистом сверхтекучем  ${}^4\text{He}$  стационарный градиент температуры можно создать лишь с помощью сверхщели, непроницаемой для нормальной компоненты. В этом случае возникает термомеханическое давление, которое можно трактовать как осмотическое давление тепловых возбуждений — фононов и ротонов.

В сверхтекучих растворах  ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$  в нормальном движении, кроме тепловых возбуждений, участвуют примесные возбуждения (квазичастицы  ${}^3\text{He}$ ). При этом выражение для потока примесей имеет вид:

$$i = -\rho D \left[ \nabla c + \frac{k_T}{T} \nabla T + \frac{k_P}{P} \nabla P \right], \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости,  $D$  — коэффициент диффузии,  $k_T D$  — коэффициент термодиффузии,  $k_P D$  — коэффициент бародиффузии, а  $c$  — массовая концентрация  ${}^3\text{He}$  в растворе.

В стационарных условиях, когда градиент давления равен нулю и можно пренебречь бездиссипативным потоком примесей, как было показано Халатниковым [1], получается следующее соотношение между градиентами температуры и концентрации:

$$\nabla c = -\frac{k_T}{T} \nabla T. \quad (2)$$

Это означает, что в сверхтекучих растворах стационарные градиенты температуры и концентрации могут возникать и без наличия сверхщели.

Возникновение стационарных состояний в сверхтекучих растворах  ${}^3\text{He}$  в  ${}^4\text{He}$  при разных условиях теоретически исследовано в работах [2,3] с учетом взаимодействия между квазичастицами. В случае достаточно низких температур, когда можно пренебречь влиянием ротонов и фононов, соотношение между градиентами температуры и концентрации в

растворе определяется лишь парциальным давлением примесных возбуждений  $P_f$  в растворе [3]:

$$\frac{\nabla x}{\nabla T} = - \frac{(\partial P_f / \partial T)_{xP}}{(\partial P_f / \partial x)_{TP}}, \quad (3)$$

здесь  $x$  – молярная концентрация  ${}^3\text{He}$  в растворе, которая связана с массовой концентрацией  $c$  соотношением  $x = 4c / (3+c)$ .

Экспериментальное исследование соотношения между  $\nabla T$  и  $\nabla x$  в растворах  ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$  проведено лишь при высоких температурах в сильно концентрированных растворах [4]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование стационарных градиентов температуры и концентрации в условиях, когда термодинамические и кинетические свойства раствора  ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$  определяются примесями (квазичастицами  ${}^3\text{He}$ ).

## 2. Методика эксперимента

Для проведения одновременных измерений градиентов температуры и концентрации использовали ячейку, схема конструкции которой приведена на рис. 1. Верхний фланец 1 находился в постоянном тепловом контакте с плитой камеры растворения, а серебряный теплообменник 2 использовали для уменьшения теплового граничного сопротивления с жидкостью. Корпус ячейки 3 был изготовлен из нержавеющей стали толщиной 0,1 мм, ее диаметр составлял 2,4 см, а высота 4,7 см. Для создания теплового потока применяли плоский нагреватель 4, который располагался в нижней части ячейки непосредственно в жидкости. Через нижний фланец ячейки 5 проходил капилляр заполнения 6.

Для измерения распределения температуры по высоте ячейки использовали два термометра 8, закрепленные в средней части ячейки на фиксированном расстоянии друг от друга (10 мм). Два емкостных датчика концентрации 9 позволяли определять концентрацию раствора по изменению диэлектрической проницаемости (см. [5,6]) и представляли собой цилиндрический конденсатор (высотой 0,5 см), электроды которого навиты в виде спирали с зазором между витками 0,1 и 0,2 мм для нижнего и верхнего датчика соответственно. Номинальная емкость верхнего датчика составляла 300 пФ, нижнего – 750 пФ, что обеспечивало определение концентрации  ${}^3\text{He}$  с погрешностью 0,1 % для верхнего датчика и 0,05 % для нижнего. В качестве термометров использовали идентичные термометры сопротивления из  $\text{RuO}_2$  с номинальным сопротивлением 1000 Ом при комнатной температуре. Сопротивление термометров измеряли с помощью моста переменного тока CryoBridge R441, погреш-

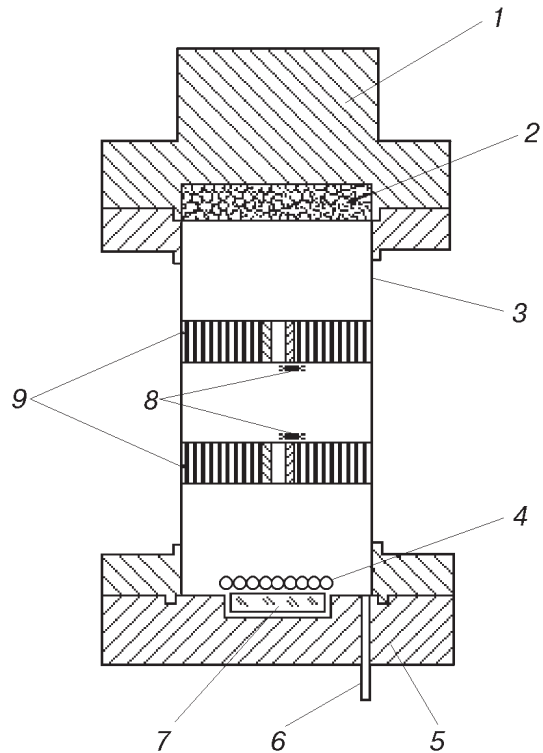


Рис. 1. Схема измерительной ячейки: 1 – верхний фланец; 2 – спеченный теплообменник; 3 – стенка ячейки; 4 – нагреватель; 5 – нижний фланец; 6 – капилляр заполнения; 7 – датчик давления; 8 – термометры сопротивления; 9 – емкостные датчики концентрации.

ность в определении температуры составляла  $\pm 0,2$  мК при температуре 230 мК и уменьшалась при понижении температуры.

Мощность теплового потока, создаваемого нагревателем, контролировали миллиамперметром, и погрешность в ее определении была меньше 1%. Холодная плита рефрижератора растворения, находящаяся в тепловом контакте плоскость – плоскость с фланцем 1, была снабжена собственным нагревателем и термометром сопротивления, что позволяло стабилизировать ее температуру. Поверхность теплообменника 2, изготовленного из ультрадисперсного серебряного порошка, составляла  $\sim 1,5$  м<sup>2</sup>. Кроме того, на плите также установлен кристаллизационный термометр, основанный на кривой плавления  ${}^3\text{He}$ , который использовали для калибровки термометров сопротивления.

Исследовали раствор с концентрацией 9,8%  ${}^3\text{He}$ , приготовленный путем смешивания известных порций газообразных изотопов гелия. Ниже 235 мК жидкий раствор расслаивался, однако при этом оба датчика концентрации 9 и оба термометра 8 были расположены в нижней сверхтекучей фазе, равновесная концентрация которой в зависимости от температуры хорошо известна. Калибровку термометров и датчиков концентрации производили при

отсутствии тепловых потоков, когда температура и концентрация были одинаковыми во всей ячейке.

### 3. Фазовое расслоение сверхтекучих растворов при наличии теплового потока

Измерения стационарных градиентов температуры  $\nabla T$  и концентрации  $\nabla x$  в исследуемом растворе проведены при разных температурах и различных мощностях теплового потока  $\dot{Q}$ . При этом были проведены эксперименты двух типов:

– эксперимент *A* – измерение температурных зависимостей  $\nabla T$  и  $\nabla x$  в исследуемом растворе при постоянной мощности, излучаемой нагревателем, температура жидкости в ячейке варьировалась за счет изменения температуры плиты рефрижератора растворения;

– эксперимент *B* – постоянной была температура камеры растворения, а температурная зависимость градиентов  $\nabla T$  и  $\nabla x$  регистрировалась в процессе изменения мощности  $\dot{Q}$  нагревателя.

Относительная погрешность в измерении  $\nabla T$  и  $\nabla x$  зависела от вводимой мощности и при  $\dot{Q} = 4,5$  мкВт/см<sup>2</sup> составляла  $\sim 2,5\%$  для  $\nabla T$  и  $\sim 10\%$  для  $\nabla x$ . Эта погрешность уменьшалась с ростом  $\dot{Q}$ .

Типичная температурная зависимость концентрации раствора, регистрируемая нижним датчиком в эксперименте *A*, приведена на рис. 2, где по оси ординат отложена средняя температура жидкости, измеряемая обоими термометрами. Кривая 1 соответствует нулевой мощности, а излом на ней – фазовому расслоению исходного раствора. При дальнейшем понижении температуры датчики концентрации регистрировали концентрацию нижней

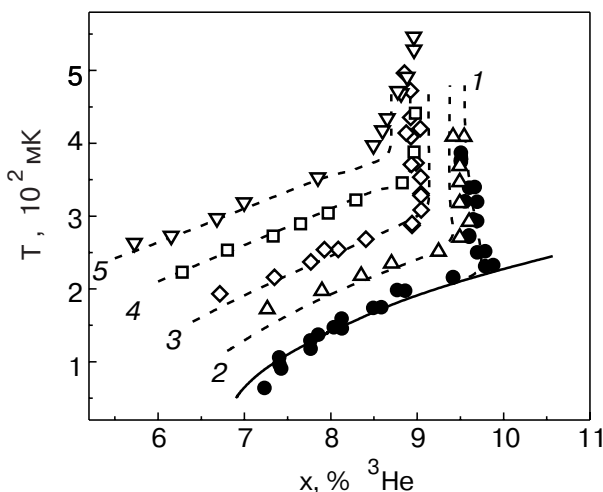


Рис. 2. Температурная зависимость концентрации раствора в эксперименте *A* при разных постоянных мощностях теплового потока  $\dot{Q}$ , мкВт/см<sup>2</sup>: 0 (1); 2,25 (2); 4,5 (3); 9 (4); 13,5 (5); сплошная линия – данные работы [7].

расслоившейся фазы, которая, как видно на рис. 2, хорошо согласуется с известными данными о линии фазового расслоения [7,8].

Кривые 2–5 на рис. 2 получены при различных постоянных значениях вводимой мощности  $\dot{Q}$ , что приводит к установлению стационарного градиента температуры по длине ячейки. Согласно двухжидкостной модели сверхтекучего гелия это инициирует встречное движение нормальной и сверхтекучей компонент, и атомы  $^3\text{He}$ , участвующие в нормальном движении, будут двигаться в сторону более низкой температуры. В результате по длине ячейки установится стационарный градиент концентрации, который будет изменяться в зависимости от вводимой мощности  $\dot{Q}$ . Так, в предположении, что распределения температуры и концентрации по длине ячейки носят линейный характер, по оценкам при  $\dot{Q} = 4,5$  мкВт/см<sup>2</sup> концентрация раствора в верхней части ячейки составляет  $x_{\text{top}} \sim 11\%$   $^3\text{He}$ , а в нижней части  $x_{\text{bot}} \sim 9\%$   $^3\text{He}$ ; при  $\dot{Q} = 13,5$  мкВт/см<sup>2</sup>  $x_{\text{top}} \sim 13,5\%$   $^3\text{He}$  и  $x_{\text{bot}} \sim 8,5\%$   $^3\text{He}$ . Поскольку расслоение раствора начинается в более холодной верхней части ячейки, то соответствующие температуры фазового расслоения, согласно [7], будут  $T_s = 290$  мК для  $\dot{Q} = 4,5$  мкВт/см<sup>2</sup> и  $T_s = 330$  мК для  $\dot{Q} = 13,5$  мкВт/см<sup>2</sup>. Эти значения хорошо коррелируют с положением изломов на кривых 2, 4 (рис. 2); такое же согласие наблюдается и для других значений  $\dot{Q}$ . Отметим лишь, что при увеличении  $\dot{Q}$  излом, соответствующий фазовому расслоению, становится менее резким.

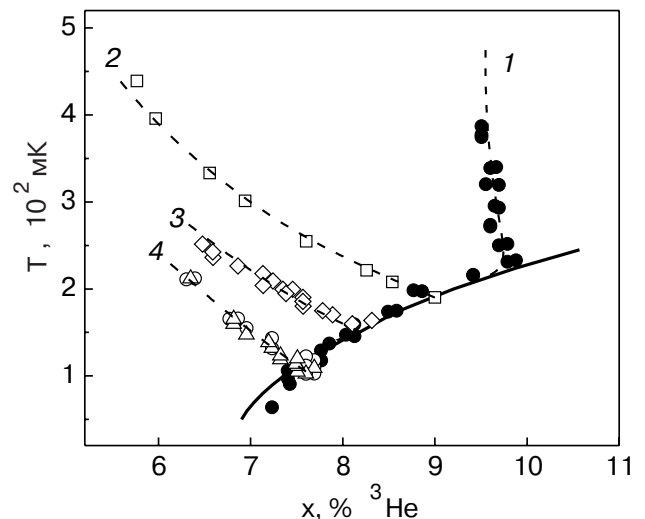


Рис. 3. Температурная зависимость концентрации раствора, регистрируемой нижним датчиком в эксперименте *B*, при следующих постоянных значениях температуры камеры растворения  $T_m$ , мК: 195 (2); 165 (3), 105 (4). Данные эксперимента *A* при  $\dot{Q} = 0$  (1); сплошная линия проведена по результатам работы [7].

На рис. 3 приведены типичные результаты эксперимента *Б*, когда измерения проводили при постоянной температуре  $T_{мс}$  камеры растворения, а тепловой поток изменялся. Как и на рис. 2, здесь приведена концентрация, регистрируемая нижним датчиком, а температура соответствует среднему значению между показаниями обоих термометров. Для сравнения на рис. 3 также приведены результаты эксперимента *А*, полученные при  $\dot{Q} = 0$  (кр. 1). Кривые 2–4 на рис. 3 были получены следующим образом. Исходной служила соответствующая точка, лежащая на линии расслоения при  $\dot{Q} = 0$ . Затем температура камеры растворения  $T_m$ , соответствующая этой точке, стабилизировалась и при постоянной  $T_m$  постепенно увеличивалось значение вводимой на нагреватель мощности  $\dot{Q}$ . При этом величина  $\dot{Q}$  достигала 11,2 мкВт/см<sup>2</sup> для  $T_m = 105$  мК и 18 мкВт/см<sup>2</sup> для  $T_m = 195$  мК. В этом случае в исследуемом растворе также возникали стационарные градиенты температуры и концентрации. Сравнение экспериментальных данных, приведенных на рис. 2 и 3, показало, что при одной и той же средней температуре и одинаковой вводимой мощности значения концентрации, регистрируемые в экспериментах *А* и *Б*, хорошо совпадали.

#### 4. Стационарные градиенты температуры и концентрации в растворах. Сравнение с теорией

Измеренные в ходе экспериментов *А* и *Б* разности температур  $\Delta T$  и концентраций  $\Delta x$  в местах расположения датчиков были использованы для определения градиентов  $\nabla T$  и  $\nabla x$ . Для адекватного сравнения полученных значений  $\nabla T$  и  $\nabla x$  эти градиенты определяли в одном и том же месте ячейки. При этом учитывалось, что высота датчика  $l = 5$  мм сравнима с расстоянием между термометрами  $L$ . Кроме того, тепловой поток, распространяющийся в жидкости внутри емкостного датчика концентрации, отличался от потока между ними, поскольку заметная часть сечения датчика была занята металлическим электродом. Если  $S$  — сечение ячейки при отсутствии датчика концентрации, а  $S_1$  — площадь сечения жидкости, по которому протекает тепловой поток при наличии датчика, то искомый градиент концентрации выражается следующим образом:

$$\nabla x = \frac{\Delta x}{L \left( 1 + \frac{Sl}{S_1 L} \right)}. \quad (4)$$

Различие в величине  $S_1$  для обоих датчиков концентрации было в пределах 5%, и оно не учитывалось при выводе формулы (4).

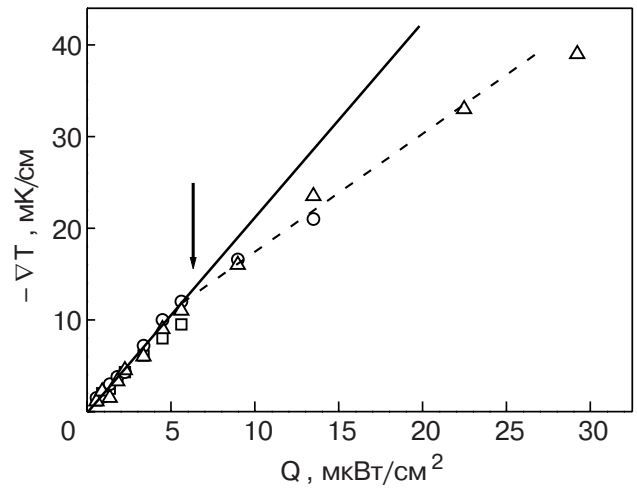


Рис. 4. Зависимость градиента температуры от мощности теплового потока при разной средней температуре ячейки  $T$ , мК: 200 (□); 300 (○); 400 (△).

При расчете градиентов температуры пренебрегли размером термометров по сравнению с расстоянием между ними, не учитывали также тепло, выделяемое термометрами сопротивлением и емкостными датчиками концентрации в процессе измерения.

На рисунках 4 и 5 приведены типичные зависимости градиентов температуры и концентрации от мощности вводимого теплового потока. Ошибка в определении  $\nabla T$  и  $\nabla x$ , обусловленная, в основном, погрешностями в измерении разности температур и концентраций между датчиками, составляла 0,5 мК и 0,07 % <sup>3</sup>He. Как видно на графиках, при малых  $\dot{Q}$  зависимости  $\nabla T$  и  $\nabla x$  от  $\dot{Q}$  являются линейными, а отклонение от линейности начинается при  $\dot{Q} > 5,6$  мкВт/см<sup>2</sup>. Это отклонение, по-видимому, связано с возникновением конвекции в исследуемом

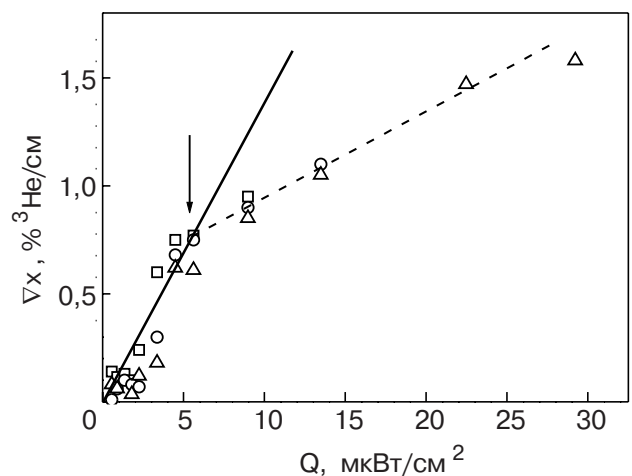


Рис. 5. Зависимость градиента концентрации от мощности теплового потока при разной средней температуре ячейки  $T$ , мК: 200 (□); 300 (○); 400 (△).

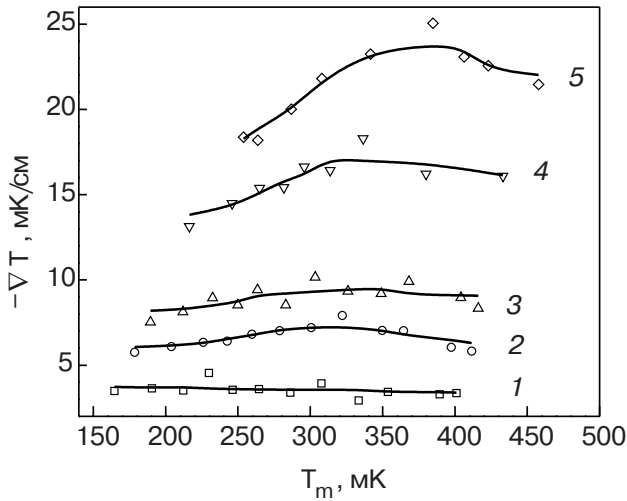


Рис. 6. Температурные зависимости градиентов температуры при различной вводимой мощности  $\dot{Q}$ , мВт/см<sup>2</sup>: 1,8 (1); 3,37 (2); 4,5 (3); 9 (4); 13,5 (5).

растворе. Проблема конвекции в условиях данного эксперимента будет обсуждаться в отдельной работе.

На рисунках 4 и 5 также видно, что градиенты температуры и концентрации слабо зависят от температуры. Более наглядно это представлено на рис. 6 и 7, где приведены температурные зависимости  $\nabla T$  и  $\nabla x$  при разных  $\dot{Q}$ .

Для сравнения полученных экспериментальных данных о стационарных градиентах температуры и концентрации в сверхтекучих растворах  $^3\text{He}-^4\text{He}$  с теорией удобно перейти к отношению  $\nabla x / \nabla T$ , которое приведено на рис. 8 и 9.

Согласно теории Халатникова [1], соотношение между  $\nabla c$  и  $\nabla T$  можно получить, исходя из выражения (2), где параметр  $k_T$  в общем случае имеет вид

$$\rho D k_T = \alpha T \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{Z}{\rho T} \right) + \frac{\beta}{T}. \quad (5)$$

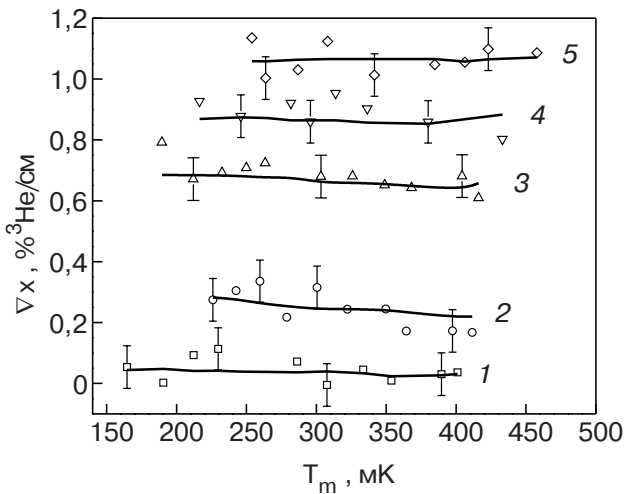


Рис. 7. Температурные зависимости градиентов концентрации при различной вводимой мощности  $\dot{Q}$ , мВт/см<sup>2</sup>: 1,8 (1); 3,37 (2); 4,5 (3); 9 (4); 13,5 (5).

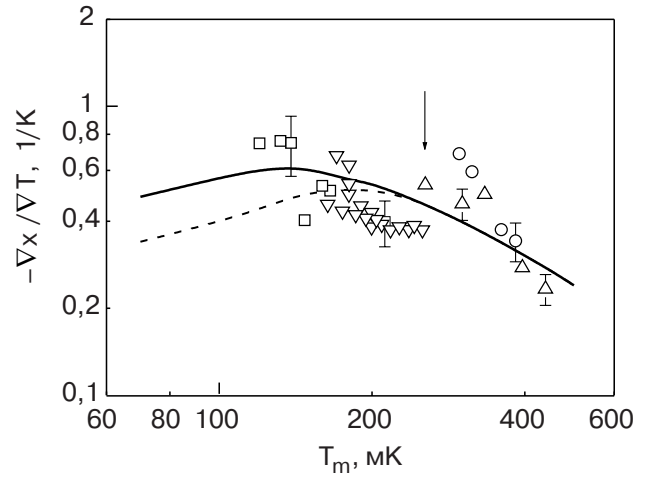


Рис. 8. Температурная зависимость отношения  $\nabla x / \nabla T$ , полученного в эксперименте Б при следующих значениях температуры верхнего фланца, мК: 105 (□); 160 (∇); 195 (Δ); 260 (○). Сплошная линия — расчет по формуле (12) для концентрации 9,8%  $^3\text{He}$ ; пунктир — для переменной концентрации, соответствующей нижней фазе расслоившегося раствора. Стрелка соответствует температуре расслоения.

Первое слагаемое в (4) соответствует вкладу примесных возбуждений, а второе — фононному вкладу с весовыми множителями  $\alpha$  и  $\beta$ . Потенциал  $Z$  выражается через разность химических потенциалов  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  в растворе:

$$Z = \rho(\mu_3 - \mu_4). \quad (6)$$

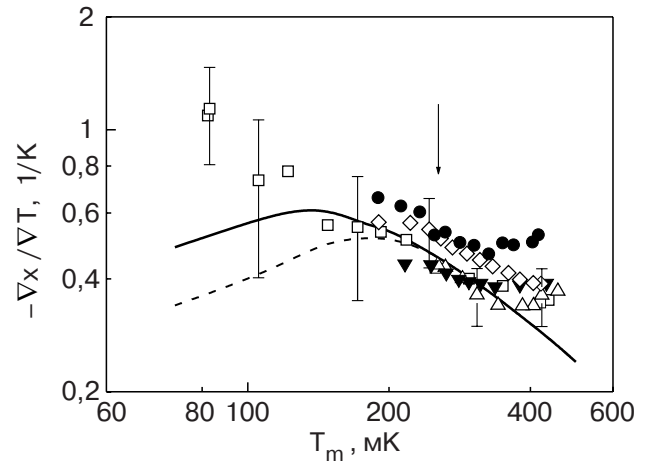


Рис. 9. Температурная зависимость отношения  $\nabla x / \nabla T$ , полученного в эксперименте А при следующих значениях вводимой мощности, мВт/см<sup>2</sup>: 1,35 (□); 4,5 (○); 5,62 (◇); 9 (∇); 13,5 (Δ). Сплошная линия — расчёт по формуле (12) для концентрации 9,8%  $^3\text{He}$ ; пунктир — для переменной концентрации, соответствующей нижней фазе расслоившегося раствора. Стрелка соответствует температуре расслоения.



Если пренебречь вкладом фононов, то из (2), (5) и (6) получается следующее выражение для отношения градиентов концентрации и температуры:

$$\frac{\nabla c}{\nabla T} = - \frac{\frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{\mu_3 - \mu_4}{T} \right)}{\frac{\partial}{\partial c} \left( \frac{\mu_3 - \mu_4}{T} \right)}. \quad (7)$$

Для использования формулы (7) необходимы значения химических потенциалов  $\mu_3$  и  $\mu_4$ , которые обычно рассчитываются [9,10] из экспериментальных данных о теплоемкости и осмотическом давлении. В связи с недостатком соответствующих экспериментальных данных во всем исследуемом интервале температур и концентраций применение выражения (6) для сравнения с данными о  $\nabla T$  и  $\nabla x$  было затруднительным.

В этом смысле более удобным для анализа является подход, развитый в работах [2–3], где авторы получили общее выражение, описывающее стационарные состояния в сверхтекучем растворе  $^3\text{He}-^4\text{He}$ . При этом любую термодинамическую величину можно выразить через три других, выбранных в качестве независимых переменных  $T$ ,  $x$  и  $\mu_4$ . Тогда полное давление раствора можно написать в виде суммы:

$$P = P_4(\mu_4, 0, 0) + P_T(\mu_4, T, 0) + P_3(\mu_4, T, x), \quad (8)$$

где  $P_4(\mu_4, T, 0)$  – вклад в давление от сверхтекучего фона при  $T = 0$  и  $x = 0$ ;  $P_T(\mu_4, T, 0)$  – термомеханическое давление, оказываемое тепловыми возбуждениями;  $P_3(\mu_4, T, 0)$  – осмотическое давление, обусловленное примесными возбуждениями.

В стационарном режиме, когда  $\mu_4 = \text{const}$ , и при отсутствии сверхщели ( $P = \text{const}$ ) выражение (8) упрощается:

$$P_T(T) + P_3(T, x) = \text{const}. \quad (9)$$

Поскольку в условиях данного эксперимента  $P_T(T) < P_3(T, x)$ , то уравнение (9) упрощается еще сильнее:

$$P_3(T, x) = \text{const}, \quad (10)$$

означая, что

$$\left( \frac{\partial P_3(T, x)}{\partial x} \right)_T dx + \left( \frac{\partial P_3(T, x)}{\partial T} \right)_x dT = 0. \quad (11)$$

Откуда

$$\frac{\nabla x}{\nabla T} = - \frac{[\partial P_3(T, x) / \partial T]_x}{[\partial P_3(T, x) / \partial x]_T}, \quad (12)$$

т. е. уравнение (12) является предельным случаем уравнения (3) для области низких температур, ко-

гда можно пренебречь тепловыми возбуждениями и полагать, что парциальным давлением  $^3\text{He}$  в сверхтекучем растворе является осмотическое давление примесных возбуждений  $P_3(T, x)$ .

Осмотическое давление сверхтекучих растворов  $^3\text{He}-^4\text{He}$  было ранее измерено в работах [11–14], а результаты этих измерений были проанализированы в [10], где приведены их сглаженные значения. Можно считать, что в исследованной области температур и концентраций имеется полный набор экспериментальных данных об осмотическом давлении, которые удовлетворительно (в пределах суммарной погрешности) согласуются друг с другом.

Отношения градиентов концентрации к соответствующим градиентам температуры, рассчитанные по формуле (12), приведены на рис. 8 вместе с экспериментальными данными, полученными в эксперименте Б. Сплошная линия на рис. 8 соответствует расчету для исходной концентрации раствора, а пунктирная линия рассчитана для концентрации нижней сверхтекучей фазы расслоившегося раствора, которая меняется с температурой. При этом не учитывался градиент концентрации по высоте нижней фазы. По горизонтальной оси на рис. 8 отложена средняя температура между датчиками  $T_m$ . На графике видно, что полученные экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с теоретической моделью, основанной на зависимости градиентов температуры и концентрации от осмотического давления.

Аналогичные результаты, полученные в эксперименте А, представлены на рис. 9 при разных постоянных вводимых тепловых потоках. Здесь согласие между экспериментом и теорией примерно такое же, как и в эксперименте Б. При этом становится заметным уменьшение величины  $\nabla x / \nabla T$  при увеличении  $\dot{Q}$ .

Полученные значения отношения  $\nabla x / \nabla T$  позволяют определить важный параметр теории сверхтекучих растворов – термодиффузионное отношение  $k_T$ , входящее в формулы (1) и (2). Температурная зависимость этого параметра приведена на рис. 10. Заметное уменьшение расчетной величины  $k_T$  (сплошная линия на рис. 10) наблюдается лишь ниже 300 мК, где изменяется концентрация сверхтекучей фазы расслоившегося раствора.

### Заключение

Впервые в области температур ниже 1 К были проведены одновременные измерения градиентов температуры и концентрации, возникающих в сверхтекучем растворе  $^3\text{He}-^4\text{He}$  при включении теплового потока. При этом использовались два типа экспериментов: изменялись температура верхнего

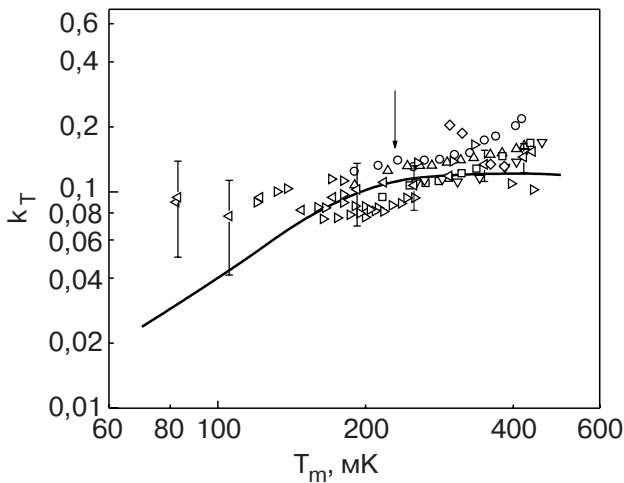


Рис. 10. Температурная зависимость термодиффузионного отношения для раствора с начальной концентрацией 9,8 %  $\text{He}^3$ . Сплошная линия — расчет по формулам (2), (12) с использованием данных об осмотическом давлении [9]. Стрелка соответствует температуре фазового расслоения.

фланца ячейки при постоянной вводимой мощности или мощность при постоянной температуре фланца. Оба эксперимента дали значения стационарных градиентов температуры и концентрации, которые хорошо согласуются друг с другом.

Исследована фазовая диаграмма расслоения раствора при наличии теплового потока, причем оба эксперимента дали совпадающие результаты. Температура и концентрация, отвечающие фазовому расслоению (излом на зависимости  $T(x)$ ), согласуются с соответствующими значениями, полученными при расчете стационарного распределения температуры и концентрации по длине ячейки после введения теплового потока.

Показано, что обнаруженное в эксперименте соотношение между стационарными градиентами концентрации и температуры может быть объяснено из условия постоянства парциального давления примесных квазичастиц  $^3\text{He}$  в растворе. В данном эксперименте роль тепловых возбуждений пренебрежима, и отношение  $\nabla x / \nabla T$  определяется лишь поведением осмотического давления примесонов. В рамках такого подхода удастся получить удовлетворительное согласие с экспериментом и определить термодиффузионное отношение  $k_T$ , описывающее в теории Халатникова связь коэффициента диффузии с термодинамическими свойствами сверхтекучего

раствора и определяющего коэффициент термодиффузии.

В заключение отметим тот круг вопросов, который мог быть исследован в условиях этого эксперимента, но не вошел в эту статью. Это, прежде всего, кинетика изменения температуры и концентрации в процессе введения или выключения теплового потока, что может быть описано соответствующими временами релаксации. Другой важной проблемой, как уже указывалось, является конвективная устойчивость сверхтекучих растворов  $^3\text{He}-^4\text{He}$  при наличии теплового потока. Эта проблема может быть описана в терминах эффективной теплопроводности жидкости, которая определяется в эксперименте как из релаксационных измерений, так и из стационарных градиентов температуры. Все эти интересные вопросы будут обсуждаться в отдельных работах.

Авторы выражают благодарность В.Н. Григорьеву, И.Н. Адаменко и К.Э. Немченко за полезное обсуждение результатов настоящей работы.

Работа была поддержана в рамках научной программы НАТО, грант PST.CLG.978495.

1. И.М. Халатников, *Теория сверхтекучести*, Наука, Москва (1971).
2. И.Н. Адаменко, К.Э. Немченко, В.И. Цыганок, А.И. Черванев, *ФНТ* **20**, 636 (1994).
3. К.Э. Немченко, *ФНТ* **23**, 799 (1997).
4. R.P. Behringer and H. Meyer, *J. Low Temp. Phys.* **46**, 407 (1982); *ibid.* **46**, 435 (1982).
5. В.А. Михеев, Э.Я. Рудаковский, В.К. Чаговец, Г.А. Шешин, *ФНТ* **20**, 621 (1994).
6. А.А. Задорожко, Т.В. Калько, Э.Я. Рудаковский, И.А. Ушеров-Маршак, В.К. Чаговец, Г.А. Шешин, *ФНТ* **28**, 107 (2002).
7. D.O. Edwards, E.M. Ifft, and R.E. Sarwinski, *Phys. Rev.* **177**, 380 (1969).
8. G.E. Watson, J.D. Reppy, and R.C. Richardson, *Phys. Rev.* **188**, 384 (1969).
9. R. Radebough, *Nat. Bur. Stand. Tech. Note*, No. 362 (1967), p.137.
10. J.G. M.Kuerten, C.A.M. Castelijns, A.T.A.M. de Waele, and H.M.Gijsman, *Cryogenics* **25**, 419 (1985).
11. J. Landau, J.T. Tough, N.R. Brubaker, and D.O. Edwards, *Phys. Rev.* **A2**, 2472 (1970).
12. M.F. Wilson and J.T. Tough, *Phys. Rev.* **A1**, 914 (1970).
13. J. Landau and R.L. Rosenbaum, *J. Low Temp. Phys.* **11**, 483 (1973).
14. L.J.M. Van der Klundert, M.R.E. Bos, J.A.M. Van der Meij, and H.A. Steffen, *Phys. Lett.* **A62**, 487 (1977).

The relation between temperature and  
concentration gradients  
in superfluid  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  solutions

A.A. Zadorozhko, T.V. Kalko, E.Ya. Rudavskii,  
V.K. Chagovets, and G.A. Sheshin

The temperature and concentration gradients  $\nabla T$  and  $\nabla x$  in a superfluid  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  mixture with an initial concentration 9,8 % of  $^3\text{He}$  are

measured in a temperature range 70–500 mK. The gradients are produced by a steady thermal flow with heating from below. It is shown that the value of  $\nabla x/\nabla T$  observed in the experiment is in good agreement with the theoretical model derived from the temperature and concentration dependences of osmotic pressure. The experimental data permitted us to obtain a thermal diffusion ratio of the solution responsible for the thermal diffusion coefficient.