

Кинетические процессы в тройных точках на кривой плавления ^4He

Е.О. Вехов, Н.П. Михин, А.В. Полев, Э.Я. Рудаковский

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

Статья поступила в редакцию 19 мая 2005 г., после переработки 7 июня 2005 г.

Исследована кинетика структурного фазового ОЦК–ГПУ перехода на кривой плавления ^4He в районах тройных точек (ОЦК–ГПУ–He II и ОЦК–ГПУ–He I) в интервале температур 1,25–2,0 К. Образцы изготовлены методом блокировки капилляра, а исследование кинетики проведено методом прецизионного измерения давления. Установлено, что вдали от тройных точек изменение давления при изменении температуры вдоль кривой плавления может быть описано экспоненциальными зависимостями. При переходе через тройные точки обнаружено аномальное поведение давления и температуры образца, которое свидетельствует в пользу предположения о переплавлении кристалла при структурном фазовом переходе.

Досліджено кінетику структурного фазового ОЦК–ГЩП переходу на кривій плавлення ^4He в районах потрійних точок (ОЦК–ГЩП–He II і ОЦК–ГЩП–He I) в інтервалі температур 1,25–2,0 К. Зразки виготовлено методом блокування капіляра, а дослідження кінетики проведено методом прецизійного виміру тиску. Встановлено, що вдалині від потрійних точок зміну тиску при зміні температури уздовж кривій плавлення може бути описано експоненціальними залежностями. При переході через потрійні точки виявлено аномальне поведіння тиску й температури зразка, що свідчить на користь припущення про переплавлення кристала при структурному фазовому переході.

PACS: 67.80.–s, 67.80.Gb

1. Введение

Особенностью фазовой диаграммы ^4He является наличие очень узкой области ОЦК фазы вблизи кривой плавления (рис. 1), что было обнаружено в 1961 г. из акустических измерений [1] и затем идентифицировано в рентгеновских экспериментах [2]. Последующие исследования теплоемкости и P – V – T измерения [3–5] позволили получить надежные сведения о термодинамических параметрах, характеризующих эту систему. Как видно на рис. 1, на кривой плавления ^4He имеются две тройные точки, где в равновесии находятся жидкость, ОЦК и ГПУ фазы, — нижняя тройная точка A (НТТ) и верхняя тройная точка B (ВТТ). Третья тройная точка C получается в результате пересечения кривой плавления и линии фазовых переходов в сверхтекучее состояние (λ -линия). Поэтому в НТТ в равновесии с ОЦК и

ГПУ фазами находятся сверхтекучий гелий (He II), а в ВТТ — нормальный гелий (He I).

Первые эксперименты по исследованию кинетики фазовых переходов в тройных точках появились лишь недавно [6–8]. В работе [6] с помощью оптического метода установлено, что фазовый переход протекает по-разному в ВТТ и НТТ. В процессе перехода через ВТТ как при нагреве, так и при охлаждении новая кристаллическая фаза зарождается внутри исходного кристалла, вызывая вначале помутнение кристалла, а затем его разрушение. Авторы полагают, что такой переход напоминает мартенситное превращение. А в НТТ, по мнению авторов, состояние исходного кристалла не играет роли в фазовом переходе, поскольку новая кристаллическая фаза растет в сверхтекучей жидкости. Оптические наблюдения зародышеобразования при переходе из He II в ГПУ фазу в области температур $T < T_A$ [9] показали, что вначале появляется метастабильная

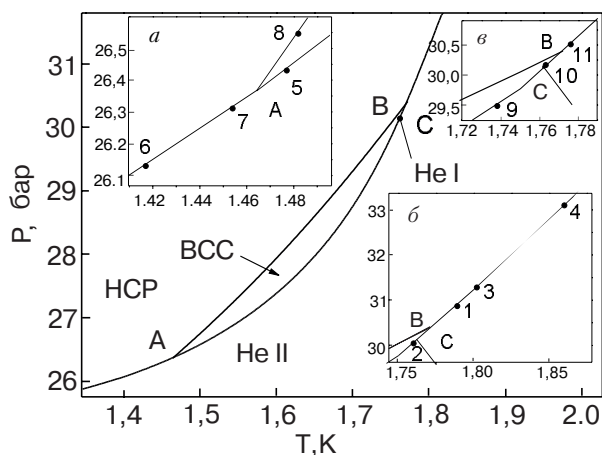


Рис. 1. Участок фазовой диаграммы ${}^4\text{He}$ в области существования ОЦК фазы. *A* — нижняя тройная точка ($T_1 = 1,464 \text{ K}$, $P_1 = 26,36 \text{ бар}$), *B* — верхняя тройная точка ($T_2 = 1,772 \text{ K}$, $P_2 = 30,40 \text{ бар}$), *C* — точка пересечения с λ -линией ($T_\lambda = 1,762 \text{ K}$, $P_\lambda = 30,13 \text{ бар}$). На вставках *a*, *б*, *в* в более крупном масштабе показаны участки вблизи тройных точек. Точки 1–11 соответствуют состояниям, которые исследованы в работе.

ОЦК фаза, которая затем исчезает, в жидкости появляется новая ГПУ фаза.

Новая важная информация о кинетике фазового перехода между двумя резко отличающимися по своей кристаллической структуре фазами — ОЦК и ГПУ — была получена с использованием импульсного ядерного магнитного резонанса [7,8]. Поскольку использовался ЯМР на ядрах ${}^3\text{He}$, то объектом исследования был слабый твердый раствор ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$, который имеет фазовую диаграмму, близкую к приведенной на рис. 1. Методика спинового эха позволяла разделить вклады, вносимые в диффузионные процессы всеми сосуществующими фазами. Установлено, что кроме вкладов, соответствующих равновесным фазам — ОЦК, ГПУ и объемной жидкости, проявляется дополнительный диффузионный процесс, характеризующийся аномально высоким значением коэффициента диффузии. Последний близок к соответствующему значению для жидкого гелия, однако сама диффузия пространственно ограничена. Такое поведение может быть связано с возникновением жидких капель в процессе ОЦК–ГПУ перехода.

Таким образом, в настоящее время нет однозначного понимания тех кинетических процессов, которые обеспечивают ОЦК–ГПУ переход. Настоящая работа предпринята с целью получить новые экспериментальные данные о кинетике фазовых переходов в тройных точках на кривой плавления ${}^4\text{He}$. При этом представлялось целесообразным использовать методику прецизионного измерения давления, которая ранее была успешно использована для исследования кинетики другого фазового перехода

— расслоения в твердых растворах изотопов гелия [10], и показала себя очень информативной.

2. Измерительная ячейка и ход эксперимента

Эксперименты проведены в ячейке, схема которой приведена на рис. 2. Медный корпус ячейки 1 имел полость в виде диска диаметром 10 мм и высотой 1,5 мм, где располагался исследуемый образец. Дно полости представляло собой подвижную мембрану емкостного датчика давления Страти-Адамса 3 [11]. Ячейку крепили к хладопроводу 4, который был связан с источником холода (градусной камерой, которая не показана на рис. 2) через слабую тепловую связь. Последняя представляла собой трубку из нержавеющей стали, заполненную небольшим количеством газообразного ${}^4\text{He}$, чтобы связь ячейки и градусной камеры осуществлялась в основном через гелиевую пленку на внутренней поверхности трубки.

Исследуемые образцы создавали методом блокировки капилляра при некотором исходном давлении, которое подбирали таким образом, чтобы образцы представляли собой смесь кристалла и жидкости с составом, соответствующим разным участкам фазовой диаграммы ${}^4\text{He}$. Температуру хладопровода поддерживали постоянной с помощью термостабилизатора, что обеспечивало заданную температуру хладопровода (от 1,25 до 2,0 К) с точностью не хуже 2–3 мК. При этом температура градусной камеры оставалась низкой (~ 1,3 К) и ее стабильная работа не нарушалась даже при нагреве ячейки термостабилизатором до ~ 2 К. Это позволило избежать нежелательных явлений, связанных с возможным переплавлением при

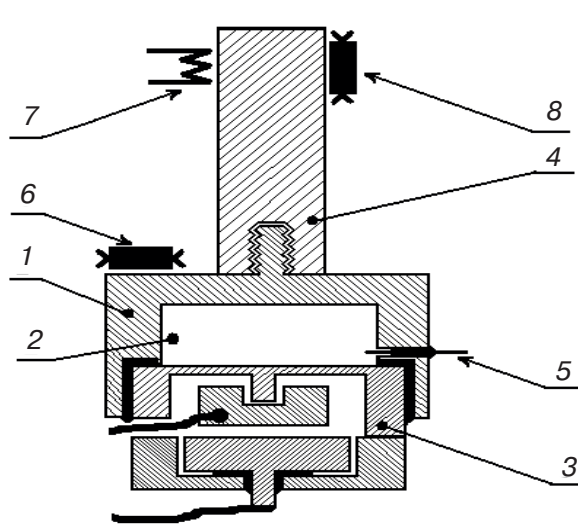


Рис. 2. Схема конструкции измерительной ячейки. 1 — корпус, 2 — объем образца, 3 — емкостной датчик давления, 4 — хладопровод, 5 — капилляр заполнения, 6 — термометр сопротивления ячейки, 7 — нагреватель, 8 — термометр сопротивления для термостабилизации.

продавливании «пробки» твердого гелия внутри капилляра заполнения. Поскольку капилляр заполнения имел хороший контакт с градусной камерой, то такая «пробка» обычно образовывалась вблизи градусной камеры. Таким образом было исследовано несколько десятков образцов, содержащих 50–60% твердой фазы.

Характерное время выравнивания температур ячейки и градусной камеры при неработающем термостабилизаторе составляло несколько секунд. В эксперименте обычно осуществлялось ступенчатое охлаждение или отогрев ячейки с шагом 10–100 мК при помощи термостабилизатора, время релаксации температуры хладопровода при этом составляло 1–3 с, а температуры образца 20–50 с. Состояние исследуемой системы регистрировалось путем измерения давления образца в ячейке при практически постоянном объеме с точностью 0,003 бар.

3. Кинетика изменения давления при изменении температуры вдоль кривой плавления

3.1. Вдали от тройных точек

При нагреве или охлаждении исследуемой двухфазной системы на кривой плавления вдали от тройных точек соответствующее временное изменение давления $P(t)$ при постоянном объеме имеет вид гладких кривых без каких-либо заметных аномалий. Типичные зависимости $P(t)$ приведены на рис. 3 для двух участков кривой плавления — ниже НТТ (ГПУ + He II) (рис. 3,а) и выше ВТТ (ГПУ + He I) (рис. 3,б). Проведенный анализ показал, что все зависимости могут быть аппроксимированы суперпозицией двух экспоненциальных функций:

$$P(t) = P_0 \pm \Delta P \left[\alpha \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + (1 - \alpha) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right], \quad (1)$$

где P_0 — конечное давление, ΔP — полное изменение давления; τ_1 и τ_2 — постоянные времени, характеризующие каждый экспоненциальный процесс, α и $(1 - \alpha)$ — весовой вклад каждого процесса. Знак «+» соответствует охлаждению системы, «-» — нагреву.

Во всех случаях ниже λ -точки на кривой плавления первый экспоненциальный процесс имеет малую постоянную времени $\tau_1 = 1-8$ с и его удельный вклад в ΔP составляет $\alpha = 0,6-0,9$. Другой, более медленный процесс, имеет обычно постоянную времени τ_2 , равную нескольким десяткам секунд и гораздо меньший вклад в ΔP . Качественно это можно объяснить, если первый процесс связать с быстрым выравниванием температур сверхтекучей жидкости и

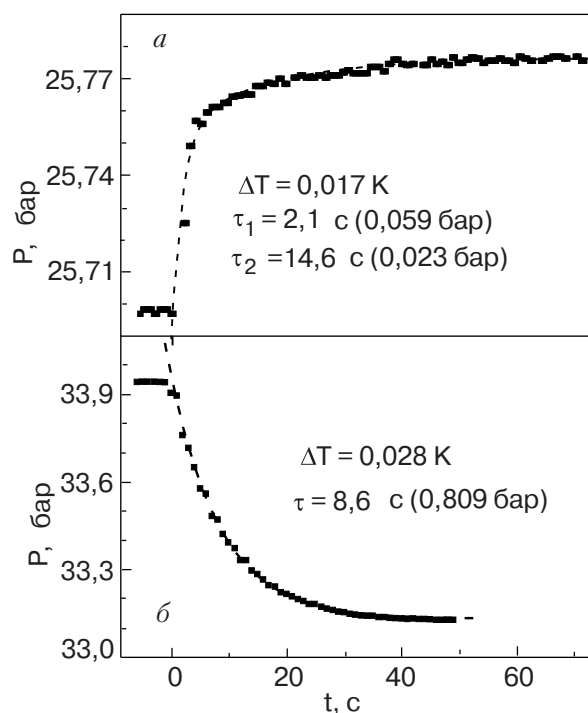


Рис. 3. Кинетика изменения давления при ступенчатом нагреве (а) на кривой плавления ниже НТТ (начальная температура 1,29 К) и ступенчатом охлаждении (б) выше ВТТ (начальная температура 1,88 К). Пунктиром показана соответствующая обработка экспериментальных данных экспоненциальными зависимостями (1).

корпуса ячейки (по оценкам это несколько секунд, с учетом скачка Капицы) и сопутствующей ему кристаллизацией (при охлаждении) или плавлением (при отогреве) в соответствии с фазовой диаграммой. Последнее подтверждается большим (60–90%) относительным вкладом этого процесса в полное изменение давления ΔP . Второй (медленный) процесс, по-видимому, обусловлен окончательной тепловой релаксацией всей системы.

Выше ВТТ процесс изменения давления хорошо описывается одной экспонентой с временем релаксации 10–20 с. В этом случае жидкая фаза не является сверхтекучей, что значительно увеличивает время выравнивания температур жидкости и корпуса ячейки, а скачок Капицы здесь становится пренебрежимым. Поскольку в этой области температур теплота плавления (кристаллизации) становится больше, это также увеличивает характерное время первого процесса. При этом второй процесс несколько ускоряется по сравнению с аналогичным процессом ниже λ -точки (в меру уменьшения доли кристаллической фазы в системе), и оба процесса оказываются практически неразличимыми. Эксперименты со ступенчатым нагревом двухфазной системы выше ВТТ показали, что действительно с ростом температуры от 1,8 до 1,9 К, т.е. уменьшением количества

кристалла, постоянная времени уменьшается на 30–40%.

3.2. Верхняя тройная точка

При переходе через верхнюю тройную точку временная зависимость $P(t)$ испытывает ряд аномалий, характер которых оказывается разным в случае охлаждения и нагрева двухфазной системы. При ступенчатом охлаждении, т.е. при переходе из состояния «жидкость + ГПУ» (точка 1, рис. 1) в состояние «жидкость + ОЦК» (точка 2, рис. 1), кинетика изменения температуры и соответствующего изменения давления показана на рис. 4. Переход через ВТТ задается уменьшением тока термостабилизации, т.е. охлаждением хладопровода 4 (рис. 2), температура которого в пределах каждой ступеньки охлаждения поддерживается постоянной в течение нескольких минут (рис. 4,а), пока давление перестает меняться и выходит на стационарное значение (рис. 4,б). Как видно на рис. 4,в, зависимость $P(t)$ коренным образом отличается от гладких экспоненциальных зависимостей, которые наблюдались вдали от тройной точки (рис. 3). Анализ наблюдаемой

зависимости $P(t)$ показал, что она может быть описана суперпозицией экспоненциальной функции (1) и некоторой немонотонной функции с максимумом (рис. 4,з). Такой характер аномалии обычно наблюдается при температурах ниже ВТТ на 5–20 мК, может содержать один или два максимума и хорошо воспроизводится.

Приведенные зависимости показывают, что при охлаждении ниже ВТТ переход ГПУ→ОЦК начинается без задержки, но происходит не сразу, а некоторыми порциями, которые могут инициироваться как температурой, т.е. последовательными ступеньками охлаждения, так и временем выжидания.

Причина появления максимумов на зависимости $P(t)$, т.е. дополнительного положительного вклада в давление $dP(t)$, может быть связана, во-первых, с образованием из переохлажденной метастабильной ГПУ фазы более рыхлой ОЦК фазы, во-вторых, с тем, что ГПУ–ОЦК переходу предшествует плавление ГПУ кристалла.

Отметим, что увеличение давления сопровождается тепловым эффектом (рис. 4,б) — повышением температуры образца. Подобный эффект также наблюдался при проведении калориметрических измерений вблизи ОЦК–ГПУ перехода [5].

Вывод о переплавлении можно подтвердить оценками соответствующих величин теплоты перехода [12]. Если предположить, что ГПУ–ОЦК переход происходит без переплавления кристалла, то должны происходить два процесса. Первый процесс (основной) — кристаллизация жидкости в ОЦК фазу, обусловленная понижением температуры, приводит к выделению скрытой теплоты кристаллизации ($\approx +7,2$ Дж/моль) и происходит в течение всего времени охлаждения; он не должен вызывать локальных по времени тепловых эффектов. Второй процесс — структурный ГПУ–ОЦК переход (НВ процесс) — должен приводить к поглощению тепла ($\approx -0,6$ Дж/моль). Тогда в рамках такой модели нельзя объяснить наблюдаемую зависимость $T(t)$ (рис. 4,б), где можно заметить локальный по времени нагрев системы.

При учете переплавления кристаллической фазы второй процесс рассматривается как суперпозиция двух других процессов: плавления исходной ГПУ фазы (НЛ процесс), который сопровождается поглощением тепла ($\approx -8,0$ Дж/моль), и кристаллизации образовавшейся жидкости в ОЦК фазу (ЛВ процесс) с выделением тепла ($\approx +7,2$ Дж/моль). Поскольку НЛ и ЛВ процессы проходят на фоне упомянутой выше кристаллизации жидкости вследствие понижения температуры (основного процесса), то в итоге наблюдается локальное по времени повышение температуры.

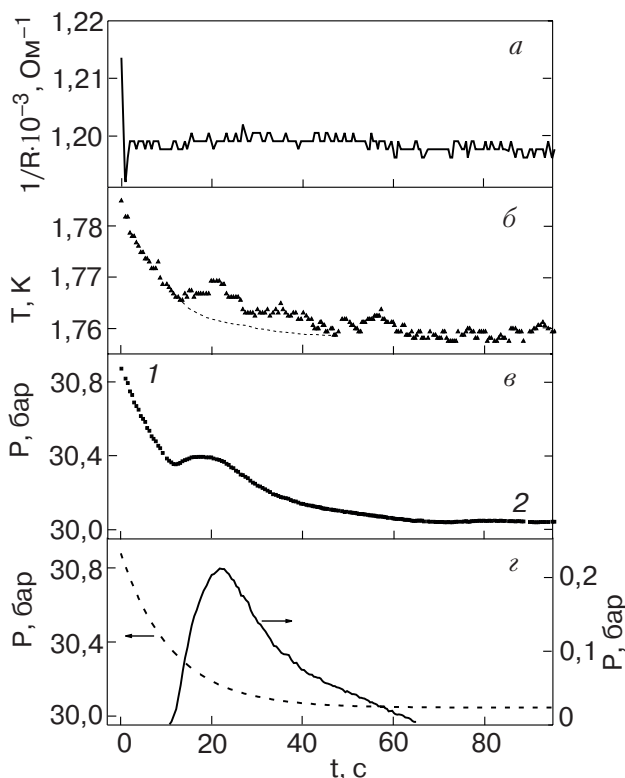


Рис. 4. Изменение показаний термометра сопротивления на хладопроводе (а), изменение температуры образца (б), кинетика изменения давления (в) и ее обработка (з) (пунктирная линия — экспоненциальное изменение давления, сплошная линия — дополнительный вклад в давление) при охлаждении через ВТТ. Цифры 1, 2 на рис. 4,в соответствуют вставке б на рис. 1.

Что же касается наблюдаемого в эксперименте локального во времени увеличения давления, то оно не противоречит модели переплавления.

Используя известные значения сжимаемости и молярных объемов, получаем, что положительный вклад в давление, связанный с НЛ процессом, доминирует над отрицательным вкладом от ЛВ процесса даже с учетом основного процесса кристаллизации.

Эффект переплавления кристалла в процессе структурного фазового перехода между двумя резко отличающимися кристаллическими решетками также проявляется при нагреве через ВТТ, т.е. при ОЦК–ГПУ переходе. Кинетика изменения температуры и давления двухфазной смеси приведена на рис. 5. Переход через ВТТ задается нагревом хладопровода 4 (рис. 2), температура которого в пределах каждой ступеньки нагрева поддерживается постоянной с помощью стабилизатора температуры. Соответствующее изменение давления вначале происходит экспоненциально, отслеживая изменение температуры образца. На фазовой диаграмме это соответствует переходу от точки 2 к точке 3 на кривой плавления (рис. 1). В точке 3 температура стабилизировалась и поддержи-

валась постоянной в течение 30–40 мин, при этом давление в системе не изменялось. Фазовый переход и связанные с ним аномалии давления (рис. 5,в) были инициированы лишь последующим отогревом системы от точки 3 до точки 4. Обычно перегрев системы, необходимый для начала фазового перехода, составлял до 100 мК. ОЦК–ГПУ переход наблюдается в виде резкого спада давления на $\sim 0,5$ бар, после чего вновь продолжается его экспоненциальный рост.

Подчеркнем, что резкий спад давления сопровождается заметным тепловым эффектом (рис. 5,б) – снижением температуры образца. Такую необычную кинетику можно объяснить тем, что вначале ОЦК фаза плавится, и часть образовавшейся жидкости кристаллизуется в ГПУ фазу.

По оценкам, тепловой эффект, вызванный поглощением тепла (при плавлении ОЦК фазы), в $\sim 1,5$ раза превышает эффект выделения тепла при кристаллизации ГПУ фазы из образовавшейся жидкости. Если же не учитывать переплавления кристалла, то перестройка решетки из ОЦК в ГПУ даст положительный тепловой эффект, что противоречит результатам эксперимента.

3.3. Нижняя тройная точка

Характер аномалии давления и температуры при охлаждении двухфазной системы «жидкость+ ОЦК» через НТТ приведен на рис. 6. При охлаждении от точки 5 к точке 6 (рис. 1) температура термостабилизации уменьшается ступенькой и затем поддерживается постоянной, а температура образца через ≈ 40 с возрастает на ≈ 20 мК. В это же время давление образца повышается на $\approx 0,75$ бар и к статическому состоянию (точка 6) система приходит через 40–50 с.

При охлаждении системы ниже НТТ должны происходить следующие процессы: основной процесс кристаллизации жидкости в меру охлаждения по кривой плавления, что сопровождается уменьшением давления образца и выделением тепла, и ОЦК–ГПУ переход (ВН процесс), который сопровождается уменьшением давления и выделением тепла. Ни один из этих процессов не может объяснить наблюдаемого на рис. 6 локального по времени повышения давления. Как и в случае ВТТ, такую зависимость $P(t)$ можно описать суперпозицией экспоненциальной функции (1) и некоторым немонотонным дополнительным вкладом в давление.

Аномальный рост давления может быть объяснен, если предположить, что ОЦК–ГПУ переход в НТТ также происходит через плавление ОЦК фазы (ВЛ процесс) и последующую кристаллизацию жидкости в ГПУ фазу (ЛН процесс). При этом тепловой эффект, сопровождающий ЛН процесс (выделение тепла), превышает тепловой эффект при ВЛ

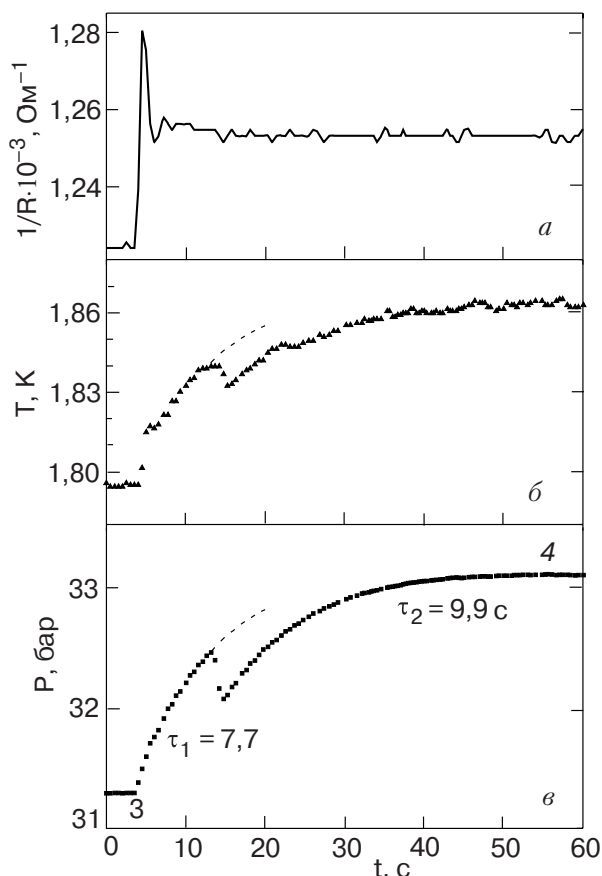


Рис. 5. Изменение показаний термометра сопротивления на хладопроводе (а), изменение температуры образца (б), кинетика изменения давления (в) при нагреве выше ВТТ. Цифры 3, 4 на рис. 5 в соответствии вставке б на рис. 1.

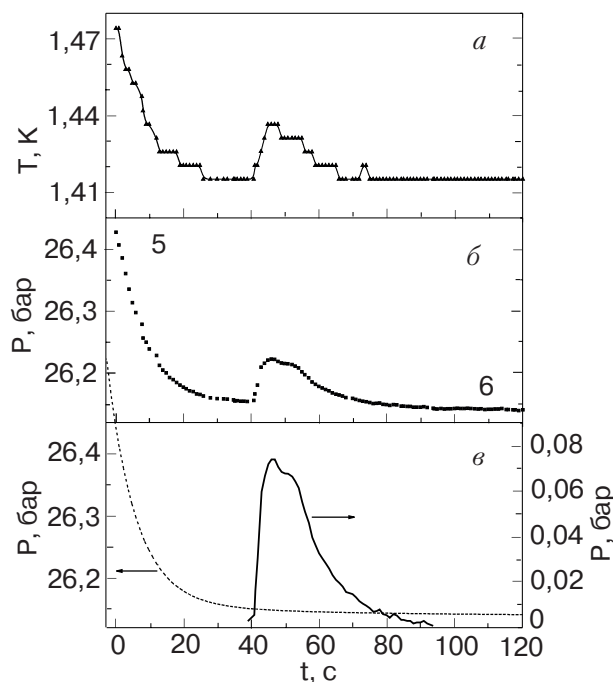


Рис. 6. Кинетика изменения температуры образца (а), давления (б) и соответствующая обработка изменения давления (в) (пунктирная линия — экспоненциальное изменение давления, сплошная линия — дополнительный вклад в давление). Цифры 5, 6 на рис. 6, б соответствуют вставке а на рис. 1.

процессе (поглощение тепла) примерно на 20%. Что же касается локального увеличения давления, то его невозможно объяснить, не используя модель переплавления, а с учетом такой модели наблюдаемый эффект в ΔP можно объяснить, считая, что VL процесс во времени опережает LN процесс.

Поведение давления при нагреве через НТТ, т.е. при переходе от состояния «жидкость + ГПУ» в состояние «ОЦК + ГПУ», показано на рис. 7. Следует отметить, что при нагреве через НТТ в наших экспериментах система ни разу не переходила в конечное равновесное состояние, соответствующее кривой плавления. Вместо этого она всегда приходила на равновесную кривую ОЦК–ГПУ. Исходное состояние соответствует точке 7 на кривой плавления ниже НТТ (рис. 1), а конечное состояние — точке 8 на линии равновесия ОЦК–ГПУ. Поскольку исходное состояние соответствует двухфазной системе «ГПУ + жидкость», а конечное состояние — системе «ГПУ + ОЦК», то система могла бы перейти в такое состояние путем кристаллизации равновесной жидкости в ОЦК фазу. Однако это сопровождалось бы понижением давления, что противоречит фазовой диаграмме и эксперименту. Согласие с экспериментом можно получить, предположив, что имеет место ГПУ–ОЦК переход, сопровождающийся ростом давления. Кинетика этого процесса показана на рис. 7, в-г, где на

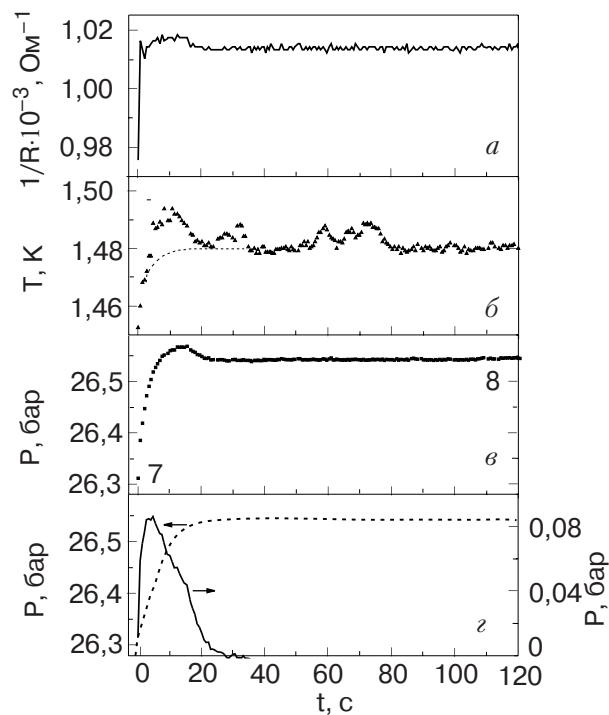


Рис. 7. Изменение показаний термометра сопротивления на хладопроводе (а), изменение температуры образца (б), кинетика изменения давления (в) и ее обработка (г) (пунктирная линия — экспоненциальное изменение давления, сплошная линия — дополнительный вклад в давление) при нагреве через НТТ. Цифры 7, 8 на рис. 7, в, г соответствуют вставке а на рис. 1.

ряду с экспоненциальным ростом давления наблюдается кратковременный (в течение первых 15–20 с) дополнительный рост давления, приводящий к тому, что зависимость $P(t)$ имеет четкий максимум. Дополнительный вклад в давление можно снова объяснить плавлением ГПУ фазы (NL процесс) с поглощением тепла ($\approx -1,7$ Дж/моль) с последующей кристаллизацией этой жидкости в ОЦК фазу (LV процесс) с выделением тепла ($\approx +1,4$ Дж/моль). При этом, по-видимому, основной вклад в локальный нагрев системы вносит кристаллизация равновесной жидкости при переходе через НТТ. Без привлечения модели переплавления ГПУ–ОЦК переход давал бы локальное охлаждение системы, что противоречит эксперименту.

4. Обсуждение

Анализируя описанное выше поведение давления при прохождении через тройные точки на кривой плавления, отметим, что во всех случаях кроме отогрева через ВТТ характер зависимости $P(t)$ одинаков: на фоне экспоненциального уменьшения давления (при охлаждении) или экспоненциального роста давления (при отогреве), что было характерно для изменения давления вдали от тройных точек,

наблюдается дополнительный вклад в давление $dP(t)$, обусловленный структурным фазовым переходом. Такой дополнительный вклад представляет собой немонотонную функцию от времени с максимумом, причем этот процесс по времени ограничен 20–30 с.

Наблюдаемое дополнительное увеличение давления при фазовом переходе можно объяснить тем, что возникновение и рост новой фазы (ОЦК или ГПУ) происходит в результате частичного или полного плавления старой кристаллической фазы. Такой вывод подтверждается проявлением соответствующих тепловых эффектов, сопровождающих плавление и кристаллизацию фаз. Этот вывод также согласуется с результатами ЯМР исследований кинетики ОЦК–ГПУ переходов в слабых твердых растворах ^3He в ^4He [7,8], где наблюдалось образование жидкой фазы (в виде капель) при сосуществовании обеих кристаллографических модификаций. Еще ранее эффект переплавления при ОЦК–ГПУ переходе наблюдался акустическим методом в работе [13].

Отметим, что предположение о плавлении исходного кристалла при ОЦК–ГПУ переходе не противоречит оптическим наблюдениям [6], где зарегистрированное помутнение исходного кристалла при прохождении через ВТТ можно трактовать как следствие образования мелких капель. Что же касается НТТ, то авторы непосредственно наблюдали плавление одной фазы и кристаллизацию другой фазы. Этот процесс может быть связан также с влиянием сверхтекучести жидкой фазы, что проявляется в НТТ как при нагреве, так и при охлаждении, а в ВТТ — только при охлаждении. Последнее обусловлено тем, что λ -точка на кривой плавления лежит всего на 10 мК ниже ВТТ, и при охлаждении система обычно (в наших экспериментах) попадает в область существования сверхтекучей фазы. В этом случае теплообмен, обусловленный переносом тепла, выделенного при плавлении старой фазы, осуществляется очень быстро по «сверхтеплопроводной» сверхтекучей жидкости. Благодаря высокой теплопередаче аномальное изменение давления начинается без заметной задержки по температуре, при этом само давление изменяется плавным образом.

Иной характер носит наблюдаемая зависимость $P(t)$ при отогреве через ВТТ, когда жидкая фаза (He I) является нормальной жидкостью с малой теплопроводностью. В этом случае наблюдается заметная задержка начала фазового перехода (на 1–2,5 бар по давлению) и вместо плавного изменения давления при ОЦК–ГПУ переходе наблюдается его резкий скачок (рис. 5,в). На этом фоне рост давления за счет плавления исходного кристалла не

всегда заметен (особенно если мало кристаллической фазы), зато изменение температуры образца (рис. 5,б) четко показывает охлаждение образца за счет поглощения теплоты перехода ОЦК — нормальная жидкость (на этом фоне выделение теплоты перехода ОЦК–ГПУ примерно на порядок меньше).

Наличие сверхтекучего перехода на кривой плавления (точка С на рис. 1) также приводит к особенностям в кинетике изменения температуры образца и давления (рис. 8). При нагреве системы через точку С экспоненциальный рост температуры и давления сменяется в этой точке небольшим плато, которое длится 10–20 с. Физической причиной этого эффекта служит очень высокая теплоемкость жидкости вблизи λ -точки.

Еще одно возможное влияние сверхтекучести проявляется в кинетике изменения давления вдали от тройных точек (см. раздел 3.1). Ниже λ -точки на кривой плавления, где жидкой фазой является He II , изменение давления $P(t)$ описывается суперпозицией двух экспоненциальных процессов — быстрого, связанного, по оценкам, с быстрым охлаждением (нагревом) He II , а следовательно, и с кристаллизацией (плавлением) на границе жидкость — кристалл, и медленного процесса, обусловленного медленной тепло-

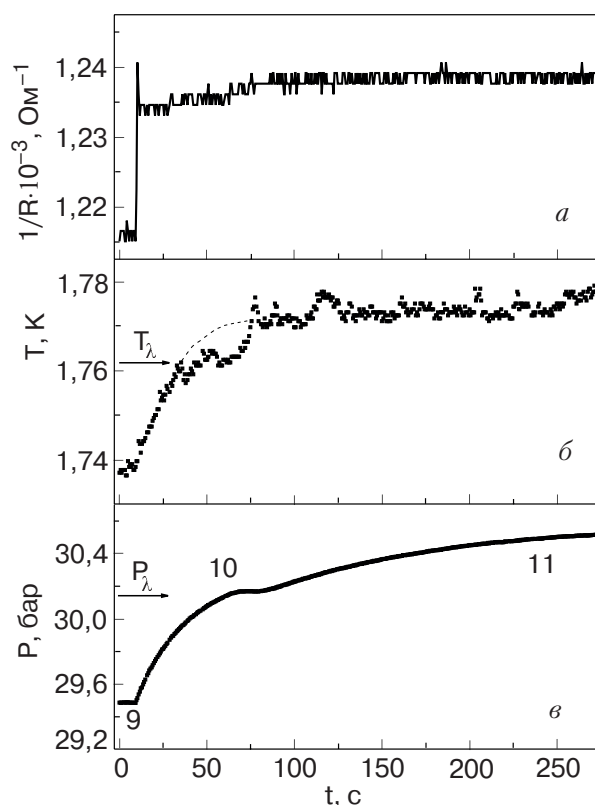


Рис. 8. Изменение показаний термометра сопротивления на хладопроводе (а), изменение температуры образца (б), кинетика изменения давления (в) при нагреве через точку С. Цифры 9, 10, 11 на рис. 8,в соответствуют вставке в на рис. 1.

вой релаксацией кристалла. Выше λ -точки, когда жидкостью является He I, быстрый процесс замедляется, и изменение давления описывается одной экспонентой с большой постоянной времени.

Обратим внимание, что кинетика изменения давления в обеих тройных точках несимметрична по отношению к направлению изменения температуры. Фазовый переход при нагреве через ВТТ и охлаждении через НТТ, т.е. при переходе из ОЦК в ГПУ фазу, идет с заметной задержкой по температуре (давлению), в то время как в обратном направлении фазовый переход начинается сразу по достижении тройной точки. Тот факт, что переход из ОЦК в ГПУ происходит труднее, чем в обратном направлении, наблюдался и ранее [6,9]. Это может быть связано с тем, что поверхностное натяжение системы «ГПУ – жидкость» почти на 25% выше, чем системы «ОЦК – жидкость».

Авторы благодарны В.Н. Григорьеву за полезную дискуссию, В.А. Майданову за предоставление экспериментальной ячейки и А.П. Бирченко за помощь в экспериментах.

Работа поддержана Украинским фондом фундаментальных исследований 02.07/00391 (проект № Ф12-7/286-2004).

1. J.H. Vignos and H.A. Fairbank, *Phys. Rev. Lett.* **6**, 265 (1961).
2. A.F. Schuch and R.L. Mills, *Phys. Rev. Lett.* **8**, 4695 (1962).
3. D.O. Edwards and R.C. Pandorf, *Phys. Rev.* **144**, 143 (1966).
4. E.R. Grilly, *J. Low Temp. Phys.* **11**, 33 (1973).
5. J.K. Hoffer, W.R. Gardner, C.G. Waterfield, and N.F. Phillips, *J. Low Temp. Phys.* **23**, 63 (1976).
6. Y. Okuda, H. Fujii, Y. Okumura, and H. Mackana, *J. Low Temp. Phys.* **121**, 725 (2000).

7. Н. Михин, А. Полев, Э. Рудаковский, *Письма в ЖЭТФ* **73**, 531 (2001).
8. A. Polev, N. Mikhin, and E. Rudavskii, *J. Low Temp. Phys.* **127**, 279 (2002).
9. T.A. Johnson and C. Elbaum, *J. Low Temp. Phys.* **107**, 317 (1997).
10. А.Н. Ганьшин, В.А. Майданов, Н.Ф. Омелаенко, *ФНТ* **24**, 815 (1998).
11. G.C. Straty and E.D. Adams, *Rev. Sci. Instr.* **40**, 1393, (1969).
12. Б.Н. Есельсон, В.Н. Григорьев, В.Г. Иванцов, Э.Я. Рудаковский, *Свойства жидкого и твердого гелия*, Изд-во стандартов, Москва (1978).
13. Н. Григорьев, Н.Е. Дюмин, С.В. Сватко, *ФНТ* **15**, 253 (1989).

The kinetic processes at triple points in the ^4He melting curve

Ye.O. Vekhov, N.P. Mikhin, A.V. Polev, and E.Ya. Rudavskii

The kinetics of BCC–HCP phase transition along the ^4He melting curve is studied in the temperature range of 1.25 to 2.0 K in the vicinity of triple points (BCC–HCP–He II and BCC–HCP–He I). The samples are produced by the capillary blocking technique, and the kinetics is investigated by the precise pressure measurements. It is found that far from the triple points the variation in the pressure with the temperature along the melting curve can be described by the exponential dependences. When passing through the triple points, the behavior of pressure and temperature becomes anomalous, favouring the assumption of crystal remelting under structure phase transition.