

КОНДЕНСИРОВАННАЯ ВОДА В СВЕРХТЕКУЧЕМ He-II*Л.П.Межов-Деглин, А.М.Кокотин**Институт физики твердого тела РАН
142432 Черноголовка, Московской обл., Россия*

Поступила в редакцию 10 ноября 1999 г.

Обнаружено, что при конденсации газообразного ^4He с примесью паров воды на поверхности сверхтекучего He-II, охлажденного до ~ 1.4 К, в объеме стеклянной ячейки, заполненной He-II, образуются полупрозрачные облака (айсберги), которые располагаются под поверхностью He-II. Форма айсбергов, извлеченных из сверхтекучей жидкости, практически не изменяется при нагреве до ~ 1.8 К. В интервале 1.8–2.2 К термометры регистрируют резкие скачки температуры, которые сопровождаются скачками давления газа в ячейке и многократным, более чем на два порядка, уменьшением суммарного объема конденсата, то есть содержание воды в объеме айсберга не превышает 10^{20} молекул H_2O в 1 см^3 . Можно предположить, что в процессе конденсации газовой смеси в объеме He-II образуются пористые айсберги, пропитанные сверхтекучей жидкостью, остов которых состоит из водяных кластеров малых размеров, окруженных слоем отвердевшего гелия.

PACS: 67.40.Yv, 67.80.Mg

В данной работе сообщается о наблюдениях метастабильных водяных облаков (айсбергов), которые образуются при конденсации газообразного гелия с примесью паров воды в сверхтекучем He-II. Судя по результатам наших исследований, а также по литературным данным [1–5] о свойствах конденсатов молекулярных газов в сверхтекучем гелии, можно предположить, что в процессе конденсации в объеме сверхтекучей жидкости образуются пористые айсберги, пропитанные He-II, остов которых состоит из водяных кластеров малых размеров, окруженных слоем отвердевшего гелия. По аналогии с аэрогелем наблюдаемый водяной конденсат можно назвать “водяным гелем”.

Заметим, что о возможности образования метастабильного конденсата в гелии при введении в криостат с жидким гелием газообразных примесей сообщалось в работе Савича и Шальникова [1], опубликованной более 50 лет назад. Было обнаружено, что при температурах ниже 2.5 К свойства образующихся примесных частиц и характер взаимодействия между ними существенно зависят не только от состава примеси, но и от температуры и свойств жидкого гелия. Например, при введении в криостат примеси воздуха в паре над жидкостью возникал туман, то есть примесные молекулы газа объединялись в кластеры малых размеров. Скорость оседания в жидком ^4He воздушных кластеров и форма “хлопьев”, которые образовывались в объеме жидкости вследствие слипания кластеров, существенно изменялись с понижением температуры и переходом от нормальной He-I к сверхтекучей жидкости He-II. Более того, оказалось, что хлопья, содержавшие примесь водорода, распадались при нагреве жидкости и переходе от He-II к He-I. Результаты наблюдений [1] послужили базой для разработки методики получения частиц малых размеров (кластеров средним диаметром 5–7 нм) испарением металла в парах гелия, которая широко используется в наши дни для декорирования распределения вихрей в сверхпроводниках

(см., например, [6, 7]), а также методики приготовления метастабильных конденсированных систем, содержащих молекулы и атомы (свободные радикалы) молекулярных газов [2]. Установка, предназначенная для введения в криостат направленной на поверхность сверхтекучего He-II струи газообразного гелия с примесью молекул и атомов исследуемого молекулярного газа (азота, например), и первые результаты исследований свойств метастабильного азотного конденсата, содержащего молекулы и атомы азота, описаны в работах [2–4]. Последующие рентгеновские измерения [5] показали, что в холодном паре над поверхностью жидкого гелия большинство примесных молекул и атомов объединяются в кластеры средним диаметром ~ 6 нм, так что в соответствии с выводами авторов работ [1, 5–7] в жидкий гелий поступает, в основном, кластерный пучок. Взаимодействие между кластерами в объеме He-II приводит к образованию метастабильного пористого конденсата, о котором мы упоминали вначале.

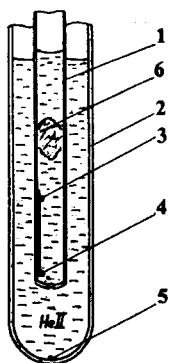


Рис.1. Схема прибора. 1 – ячейка, 2 – ампула, 3, 4, 5 – термометры, 6 – айсберг

Конструкция прибора показана схематически на рис.1. Экспериментальная ячейка – стеклянная трубка 1 внутренним диаметром 9 мм с выходным отверстием диаметром 1.5 мм в нижней части трубки помещена внутри стеклянной ампулы 2. Прибор расположен внутри стеклянного гелиевого дьюара. Ампулу и ячейку можно периодически заполнять сверхтекучей жидкостью из наружной гелиевой ванны при помощи теплового насоса. Германиевые термометры 3, 4 и 5, расположенные внутри ячейки и на дне ампулы, позволяют контролировать распределение температуры в приборе. Газообразный ^4He с примесью паров воды поступает в ячейку сверху. Как видно из рис.1, в нашем приборе весь газ конденсируется внутри экспериментальной ячейки, в отличие от прибора, описанного в [2], где значительная часть поступающего газового потока уносится вместе с парами жидкого гелия в линию откачки дьюара.

Для контроля за скоростью поступающего газового потока используется дифференциальный манометр (на рис.1 не показан), соединенный с линией набора смеси, который позволяет измерять разность давлений газа в трубке и в гелиевом дьюаре и при необходимости соединять ячейку с наружной гелиевой ванной для выравнивания давлений. Помимо визуальных наблюдений за процессами, происходящими в ячейке при наборе примеси и отогреве конденсата, ход эксперимента записывали на видеопленке при помощи камеры, установленной снаружи дьюара.

Перед началом экспериментов дюар заполняли жидким ^4He и затем охлажда-ли откачкой паров жидкого гелия до температуры $T = 1.3 - 1.4 \text{ K}$. Далее с помо-щью теплового насоса ампулу и ячейку заполняли сверхтекучим He-II. Газообразный ^4He , содержащий около 3% примеси паров воды, поступал в ячейку через верхний конец трубки, который соединялся с линией набора смеси через вентиль с тонкой регулировкой. Как показали наблюдения, оптимальная скорость набора составля-ла $\sim 0.5 \text{ cm}^3/\text{с}$ газа при атмосферном давлении, при этом разность давлений газа внутри трубки и в дюаре поддерживалась на уровне 100-200 Па. Теплый газ охлаж-дался при движении потока вдоль трубки и конденсировался на поверхности He-II. Температура He-II в ячейке и ампуле в процессе набора повышалась менее чем на 0.1 К. Естественно, что значительная часть примеси конденсировалась в виде льда на стеклянной стенке в верхней части трубки. Поэтому о содержании воды в кон-денсате, образующемся в объеме He-II, можно было судить только по результатам экспериментов.

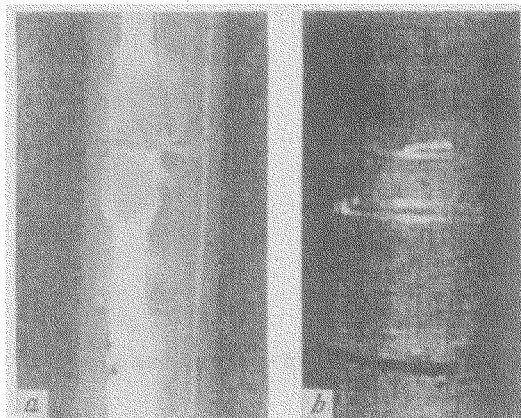


Рис.2. а – Фотография айсбергов, распо-ложенных под поверхностью He-II; б – куполообразная верхняя часть айсбер-га выступает над поверхностью He-II в ячейке (уровень жидкости в ампуле ни-же уровня He-II в ячейке)

Через несколько минут после начала конденсации под поверхностью жидкости возникало полупрозрачное в видимом свете облако диаметром, близким к диамет-ру ячейки, которое медленно сползало вниз вдоль стенки трубки. При перекрытом наборе и постоянной температуре в ячейке $T \sim 1.4 \text{ K}$ первоначальная форма облака изменялась со временем: от “мягкого” облака с изменяющейся в процессе переме-щения формой к более плотному, судя по уменьшению пропускания света, практи-чески неподвижному “айсбергу” средним диаметром, близким к диаметру трубки, подвешенному на стенках внутри ячейки на некотором расстоянии от поверхности жидкости. Повторяя набор, удавалось приготовить два-три айсберга, располагав-шихся друг под другом внутри ячейки (рис.2а). В процессе набора часть примеси конденсировалась, естественно, на стенках ячейки непосредственно вблизи грани-цы раздела жидкость-пар. Это приводило к появлению мениска глубиной порядка 1–2 мм на первоначально плоской поверхности He-II. Если прекратить конденсацию и повысить уровень He-II в ячейке, поверхность жидкости вновь будет плоской, то есть сверхтекучий гелий хорошо смачивает образующийся водный конденсат, гораз-до сильнее, чем поверхность стеклянной стенки.

При последующем плавном понижении уровня сверхтекучей жидкости в ячейке можно было наблюдать появление блестящего верхнего края айсберга, выступающего

над поверхностью He-II (рис.2b). Затем айсберг скачком смещался вниз и останавливался вновь на некотором расстоянии под поверхностью жидкости. Можно было наблюдать несколько последовательных прыжков айсберга при монотонном падении уровня жидкости. Прыжки айсбергов сопровождались скачками давления в ячейке, но температура жидкости при этом практически не изменялась, то есть причиной прыжков было истечение холодного газа с поверхности айсберга, подогреваемого внешним источником света (айсберг поглощает видимый свет гораздо сильнее, чем жидкий гелий или стенки стеклянного прибора).

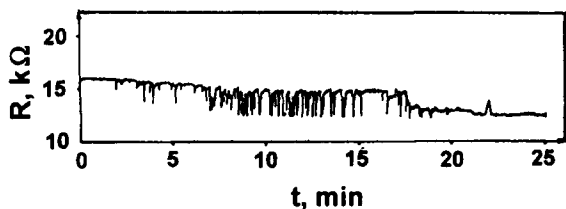


Рис.3. Скачки температуры при отогреве айсбергов в атмосфере газообразного гелия (верхний термометр). Начальная температура $T = 1.8$ К, амплитуда скачков соответствует $\Delta T \sim 0.3$ К

Еще более сильный поток газообразного гелия наблюдался с поверхности “сухих” айсбергов, лежащих на дне ячейки, из которой только что удалили жидкий гелий. Пока уровень He-II в ампуле 2 (рис.1) находился на расстоянии 0.5–2 мм от выходного отверстия, на поверхности жидкости можно было видеть четко выраженный конус глубиной ~ 1 мм, который указывал на существование сильной газовой струи, выходящей из ячейки. В атмосфере газообразного гелия температура айсбергов, подогреваемых внешним осветителем, монотонно возрастала от ~ 1.4 до ~ 1.8 К в течение длительного времени (десятки минут). В области 1.8 – 2.2 К термометры 3 и 4 регистрировали резкие скачки температуры амплитудой $\Delta T \sim 0.3$ К (изменение со временем показаний верхнего термометра иллюстрирует термограмма, показанная на рис.3; запись включена при повышении температуры внутри ячейки до 1.8 К). Скачки температуры сопровождались скачками давления и распадом айсбергов на мелкие льдинки. Суммарный объем конденсата падал почти на 2 порядка. Выше 2.2 К скачки прекращались, и температура газа внутри ячейки довольно быстро повышалась до $T \geq 4.2$ К. Из этих наблюдений легко оценить, что содержание воды в объеме айсберга составляет порядка 10^{20} молекул/см³, а энергия взаимодействия между кластерами, образующими водяной гель, не превышает десятков К.

Важно отметить, что в ячейке, заполненной жидкостью, при повышении температуры от 1.4 до 4.2 К объем айсбергов практически не изменялся. Поэтому распад конденсата в газовой атмосфере нельзя объяснить только падением теплопроводности жидкости, пропитывающей пористое вещество, при переходе от He-II к He-I.

При длительном наборе газовой смеси в объеме и на дне ячейки скапливалось большое количество конденсата. В этом случае скачки давления в замкнутой ячейке при понижении уровня He-II достигали $\Delta P \sim 2000$ Па, что приводило к продавливанию (экструзии) части конденсата через выходное отверстие в ампулу. В результате в жидкости на дне ампулы появлялся слой мелкозернистого порошка белого цвета, который был стабилен при повышении температуры жидкого гелия от 1.4 до 4.2 К, так же как и льдинки, образующиеся на стенках ячейки после распада айсбергов.

Следовательно, даже небольшие неоднородные механические напряжения могут приводить к распаду пористого конденсата в сверхтекучей жидкости.

В заключение отметим, что исследования свойств "мягких" облаков, образующихся в момент конденсации, и айсбергов, в которые они трансформируются со временем, продолжаются. По аналогии с конденсатами молекулярных газов естественно предположить, что водный конденсат в сверхтекучем гелии состоит, в основном, из водных кластеров средним диаметром порядка 5 нм (то есть в одном кластере содержится порядка 10^4 молекул H_2O), окруженных слоем отвердевшего гелия. Взаимодействие между этими частицами приводит к возникновению нового пористого вещества (водяного геля), свойства которого заметно изменяются со временем даже при постоянной температуре $T \geq 1.3$ К и/или при изменении температуры и свойств жидкого гелия, пропитывающего пористую систему.

Авторы благодарны В.Б.Ефимову, А.А.Левченко, Г.В.Колмакову, В.В.Кведеру и Ю.А.Осипьяну за полезные обсуждения. Работа выполняется в рамках программы ГНТП "Актуальные направления в физике конденсированных сред", финансируемой Министерством науки РФ, направление "Фуллерены и атомные кластеры".

-
1. P.Savich and A. Shalnikov, J. Phys. USSR 10(3), 299 (1946).
 2. Е.Б.Гордон, Л.П.Межов-Деглин, О.Ф.Пугачев, В.В. Хмеленко, ПТЭ 6, 247 (1975).
 3. Е.Б.Гордон, Л.П.Межов-Деглин, О.Ф.Пугачев, Письма в ЖЭТФ 19, 103 (1974).
 4. Е.Б.Гордон, Л.П.Межов-Деглин, О.Ф.Пугачев, В.В.Хмеленко, ЖЭТФ 73, 952 (1977).
 5. V.Kiryukhin, B.Kreimer, R.E.Boltnev et al., Phys. Rev. Lett. 79, 1774 (1997).
 6. Л.Я.Винников, А.О.Голубок, *Высокоразрешающая методика прямого наблюдения магнитной структуры на поверхности сверхпроводников II-рода*. Препринт ИФТТ РАН, Черногловка, 1984, с.9.
 7. L.Ya.Vinnikov, I.V.Grigor'eva, and L.A.Gurevich, in: *The Real Structure of HTSC Superconductors*, Springer Series in Material Science 23, Ed. V.Sh.Shehtman, Springer, 1993, p.89.