

Рис. 6. (а) Нижняя часть кадра изображения поверхности "сшита" с верхней частью кадра производной туннельного тока по расстоянию Z острие – образец. (Оба полных кадра, каждый из которых занимает всю плоскость изображения, снимались в ходе одного эксперимента.) (б) Сечение вдоль линии, показанной на изображении (а).

X, Y . В квазиклассической модели туннелирования ток зависит от Z экспоненциально с показателем, пропорциональным $W^{1/2}$ (W — работа выхода). Следовательно, в описываемом опыте измеряется зависимость работы выхода от координат на поверхности.

Как видно на рис. 6, изменения показателя экспоненты довольно значительны. При этом непосредственно на границе есть аномалия полушириной всего примерно 0,25 нм, что даже несколько меньше межатомного расстояния. Таким образом, на границе формируется проводник минимальной ширины — в один атом.

Описанные эксперименты дали обширный материал по структуре особенностей на поверхности скола, отражающей в атомном масштабе процессы, идущие при разрушении металла, и их специфическим электронным свойствам.

Автор признателен А.Ф. Андрееву за интерес к работе.

Особо хочется выразить признательность А.И. Шальникову, который не только воспитал моего учителя, М.С. Хайкина, но и на протяжении многих лет своими советами, критикой, интересом, поддержкой работ по сканирующей туннельной микроскопии в ИФП АН СССР на их начальной стадии участвовал в формировании меня как ученого и человека. И мне было приятно и

лестно представить этот доклад на сессии Отделения физических наук РАН, посвященной его столетию.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 01-02-16711 и 04-02-17369.

Список литературы

1. Эдельман В С *УФН* **123** 257 (1977)
2. Lin Y, Allen R E *Phys. Rev. B* **52** 1566 (1995)
3. Трояновский А М, Эдельман В С *Кристаллография* **44** 336 (1999)
4. Трояновский А М, Эдельман В С *Письма в ЖЭТФ* **60** 104 (1994)
5. Трояновский А М, Эдельман В С *Письма в ЖЭТФ* **60** 285 (1994)
6. Хлюстикова И Н, Эдельман В С *ПТЭ* (1) 158 (1996)
7. Edel'man V S et al. *J. Vac. Sci. Technol. B* **9** 618 (1991)
8. Классен-Неклюдова М В *Механическое двойникование кристаллов* (М.: Наука, 1960)
9. Офицеров А В, Эдельман В С *ЖЭТФ* **120** 731 (2001)
10. Jezequel G, Thomas J, Pollini I *Phys. Rev. B* **56** 6620 (1997)
11. Edel'man V S et al. *Europhys. Lett.* **34** (2) 115 (1996)
12. Edel'man V S *Phys. Lett. A* **210** 105 (1996)

PACS numbers: **61.46. + w**, **67.40. Yv**, **76.30. - v**

Примесные нанокластерные структуры в жидком гелии

Л.П. Межов-Деглин

1. Введение

Первые целенаправленные эксперименты по приготовлению и изучению свойств примесных нанокластерных конденсатов в сверхтекучем HeII были поставлены в Черногоровке в начале 70-х годов [1–3] по инициативе А.И. Шальникова. Исходная идея Александра Иосифовича — попытка приготовления пленки атомарного (металлического) водорода конденсацией атомов H на подложку, охлажденную до температуры T порядка 1 К, выглядела вполне привлекательной. Было известно, например, что тонкие пленки висмута, напыленные на подложку, охлажденную до $T \approx 4,2$ К, являются сверхпроводниками, хотя в обычных условиях висмут — полуметалл с малой концентрацией свободных носителей заряда. Однако эти пленки метастабильны и при нагреве подложки выше 20 К рекристаллизуются, так что при последующем охлаждении пленка подобно массивному образцу ведет себя как полуметалл. Можно ли приготовить квазидвумерную пленку атомарного водорода осаждением атомов H на твердую подложку, охлажденную ниже 1 К? Как локализовать свободные атомы водорода на поверхности подложки и свести к минимуму вероятность их подбарьерного туннелирования, сопровождаемого рекомбинацией атомов $H + H \rightarrow H_2$, оказавшихся в соседних узлах? Будет ли подобная пленка атомарного водорода обладать металлической проводимостью и тем более сверхпроводимостью? Ответы на подобные вопросы мог бы дать только прямой эксперимент, проведение которого затруднительно даже в наши дни. Как мы знаем сегодня [4], рекомбинация атомов водорода ограничивает максимальное содержание свободных атомов H в пропитанных сверхтекучим HeII трехмерных образцах дейтеро-

водородного конденсата, которые готовят конденсацией на поверхности сверхтекучей жидкости газового пучка, содержащего атомы водорода и дейтерия, значениями $n_H \sim 7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, так что относительное содержание атомов H в молекулярной матрице $\text{H}_2/\text{HD}/\text{D}_2$, которая образует каркас геля, не превышает 1 %.

Возможность постановки подобных исследований, лежащих на стыке физики и химии низких температур, Александр Иосифович обсуждал с сотрудниками ряда московских институтов, в родном ему ленинградском Физтехе и, наконец, в Институте физики твердого тела в Черноголовке, становлению мощной низкотемпературной базы которого он во многом способствовал. Было решено, что в ИФТТ будет собрана низкотемпературная установка, а высокотемпературный источник атомарного водорода (диссоциатор) для нее можно будет изготовить в Физтехе. Однако со временем первоначальный план работы пришлось кардинально изменить. Напомним, что в начале 60-х годов, в период создания научного центра Академии наук СССР в Черноголовке, исследования способов накопления и хранения свободных радикалов, в простейшем случае атомов молекулярных газов в молекулярных матрицах, входили в список основных тематик будущего центра. Интерес к данным исследованиям подогревался тем, что в случае удачи их результаты можно было бы использовать, например, для повышения удельного импульса топлива для ракетных и авиационных двигателей, так как энергия, выделяемая при рекомбинации атомов водорода или азота, сравнима с энергией, выделяемой при горении водорода в кислороде. Но в середине 60-х годов интерес к этой тематике заметно упал. Одной из причин этого было появление монографии [5], опубликованной Национальным бюро стандартов США, где на основании проведенных в НБС экспериментов и теоретических расчетов был сделан вывод о том, что в пленках толщиной порядка десятка молекулярных слоев и более, приготовляемых напылением атомов и молекул исследуемого вещества на подложку, охлажденную до $\sim 4 \text{ К}$, максимальное содержание свободных радикалов не может превышать десятых долей процента (а для атомов H и сотых процента) вследствие тепловой неустойчивости подобных образцов и дальнейшее понижение температуры подложки несущественно. Эти оценки были на один–два порядка ниже уровня запросов промышленности. Неудивительно, что у предложенной Шальниковым идеи, реализация которой требовала затрат довольно больших сил и средств, нашлись не только сторонники, но и серьезные оппоненты, возражения которых опирались на выводы монографии [5].

Помимо группы сотрудников ИФТТ, которые обладали большим опытом работы в области физики низких температур, к постановке описанных в [1–3] исследований нам удалось привлечь сотрудников ФИХФ, специализировавшихся в области физики и химии газовых пучков. Как показал проведенный нами анализ, одна из основных причин неустойчивости пленки, которую готовят в высоком вакууме напылением атомов и молекул исследуемого вещества на холодную подложку, связана с тем, что кинетическая энергия атомов, образующихся в диссоциаторе при термической диссоциации молекул или, например, диссоциации под действием СВЧ-излучения, превышает 10^3 К , т.е. более чем

на два порядка превосходит температуру подложки. Это существенным образом определяет кинетику химических реакций на поверхности и приводит к тепловой неустойчивости толстых пленок с большим содержанием свободных радикалов.

Один из эффективных путей понижения кинетической энергии атомов, выходящих из диссоциатора, — использование плотного холодного буферного газа, например ^4He , который практически не вступает в химические реакции с исследуемым веществом и который легко охладить до нескольких кельвинов в экспериментах с жидким гелием. Более того, для обеспечения высокой скорости отвода тепла с поверхности пленки и предотвращения развития тепловой неустойчивости вследствие рекомбинации атомов твердую подложку можно заранее покрыть слоем сверхтекучего HeII. Один из недостатков подобной методики очевиден — если скорость движения конденсирующегося на поверхности HeII газового потока невелика, то в холодном гелиевом паре над жидкостью атомы и молекулы примеси могут успеть коагулировать в кластеры, так что на границу раздела фаз пар–сверхтекучая жидкость будет попадать поток, содержащий, в основном, кластеры исследуемой примеси. Впрочем, это можно отнести и к достоинствам предложенной методики. Известно, что при температурах порядка 1 К в сверхтекучем HeII и в насыщенном паре над поверхностью жидкости нейтральная примесная частица окружена, как правило, одним-двумя слоями атомов отвердевшего ^4He , т.е. образуется так называемый ван-дер-ваальсовский комплекс, состоящий из примесной наночастицы и слоя отвердевшего гелия вокруг нее. Это снижает вероятность коалесценции примесных наночастиц с образованием кристаллитов в объеме примесного конденсата, который формируется на поверхности и в объеме HeII вследствие взаимного притяжения между комплексами [6, 7], и открывает возможности изучения кинетики образования примесных нанокластеров в газовой фазе и туннельных химических реакций в отдельных кластерах и в нанокластерных примесь-гелиевых конденсатах (примесных гелях), содержащих свободные радикалы, при низких и сверхнизких температурах.

В первых экспериментах [1–3] мы исследовали возможность стабилизации атомов азота в сверхтекучем гелии. Атомы N получали при пропускании потока газообразного ^4He с примесью молекулярного азота N_2 через газоразрядную трубку. Выбор азота не случаен: рекомбинация атомов азота сопровождается люминесценцией в видимом диапазоне, что существенно при проведении поисковых исследований. Судя по оценкам, приводимым в работах [2–4, 6, 7] и в последующих публикациях корнельской и финской групп [8–15], относительная концентрация атомов азота в каркасе формирующегося в жидкости примесного геля, т.е. отношение $[\text{N}]/([\text{N}] + [\text{N}_2])$ может достигать десятков процентов. Таким образом, переход от традиционной методики напыления атомов молекулярных газов в вакууме на холодную твердую подложку к введению газовой струи в сверхтекучий HeII, охлажденный ниже 1,6 К, привел к повышению относительной концентрации свободных атомов в объеме азотного конденсата почти на два порядка по сравнению с приводимыми в монографии [5] оценками максимально достижимой концентрации свободных радикалов в молекулярной матрице. Вслед за

азотом на той же установке была проведена серия пробных экспериментов с примесями кислорода, дейтерия и водорода.

Несмотря на явный поворот темы исследований, А.И. Шальников продолжал активно интересоваться ходом нашей работы. Его замечания и советы были тем более ценны, что сам он обладал большим опытом приготовления тонких пленок конденсацией вещества на холодную подложку [16], разрабатывал методы получения коллоидов и гелей [17], а в 1946 г. совместно с Савичем опубликовал работу [18], в которой сообщалось о наблюдении особенностей коагуляции газообразных примесей (в первую очередь, воздуха), которые вводили в стеклянный сосуд дьюара с жидким гелием, охлажденным ниже 2,5 К. Было обнаружено, что охлаждение жидкости ниже точки перехода T_λ из нормального HeI в сверхтекучее HeII состояние сопровождается качественным изменением механизмов коагуляции примесных частиц, которые образуются в паре над жидкостью: от мелкодисперсной взвеси или тумана, заполняющего весь дьюар при $T > T_\lambda$, к медленно оседающим в жидкости крупным хлопьям при охлаждении жидкости ниже T_λ . При замене воздуха на водород наблюдалась и обратная картина — распад крупных хлопьев примеси, плавающих на поверхности жидкости, на мелкие частицы при повышении температуры жидкости более T_λ . Распад сопровождался образованием "нимба" над крупной водородной частицей. Эти наблюдения указывали, что строение и свойства примесных частиц, которые образуются в плотном гелиевом паре над поверхностью жидкости, а также свойства образцов примесного конденсата, формирующегося в жидком гелии, существенно зависят не только от состава примеси, но и от свойств жидкого гелия.

В настоящее время исследования примесь-гелиевых конденсатов проводятся группами экспериментаторов, работающими как в ИФТТ [19–24] и ФИЭПХФ [6–15,

25] научного центра РАН в Черноголовке, так и в других лабораториях, в частности в Корнельском университете (США) [4, 8–14] и Университете Юваскилы (Финляндия) [15, 25]. Завершается подготовка к проведению совместных (ИФТТ РАН, Черноголовка; ОИЯИ, Дубна; Институт Лауэ–Ланжевена (ИЛЛ), Гренобль) нейтронных исследований структуры гелей дейтерия и тяжелой воды в HeII на нейтронном пучке Института Лауэ–Ланжевена [23, 24, 26, 27].

2. Методика приготовления образцов примесных гелей

Схема установки, описанной впервые в работах [1–3], которую используют и в настоящее время для приготовления примесных конденсатов, содержащих атомы молекулярного газа, показана на рис. 1а. Суммарная концентрация газовых примесей в струе газообразного ^4He , которую предварительно пропускают через охлаждаемую жидким азотом газоразрядную трубку (СВЧ-диссоциатор, установленный в верхней части прибора), не превышает нескольких процентов. Относительное содержание атомов исследуемой молекулярной примеси в газовой струе на выходе из диссоциатора, например отношение $[\text{N}]/([\text{N}] + [\text{N}_2])$ в экспериментах с атомарным азотом, достигает $\sim 90\%$. Поскольку удельная плотность твердого водорода почти вдвое меньше плотности жидкого гелия, для стабилизации атомов водорода в образцах примесного конденсата в объеме HeII в газовую струю вместе с водородом приходится вводить дейтерий или другие более тяжелые примеси, например инертные газы.

Диаметр выходного отверстия на дне трубки составляет $\sim 0,5$ мм. Выходящую газовую струю направляют непосредственно на поверхность сверхтекучей жидкости, которая заполняет стеклянный стакан, установленный внутри гелиевого сосуда дьюара непосредственно под

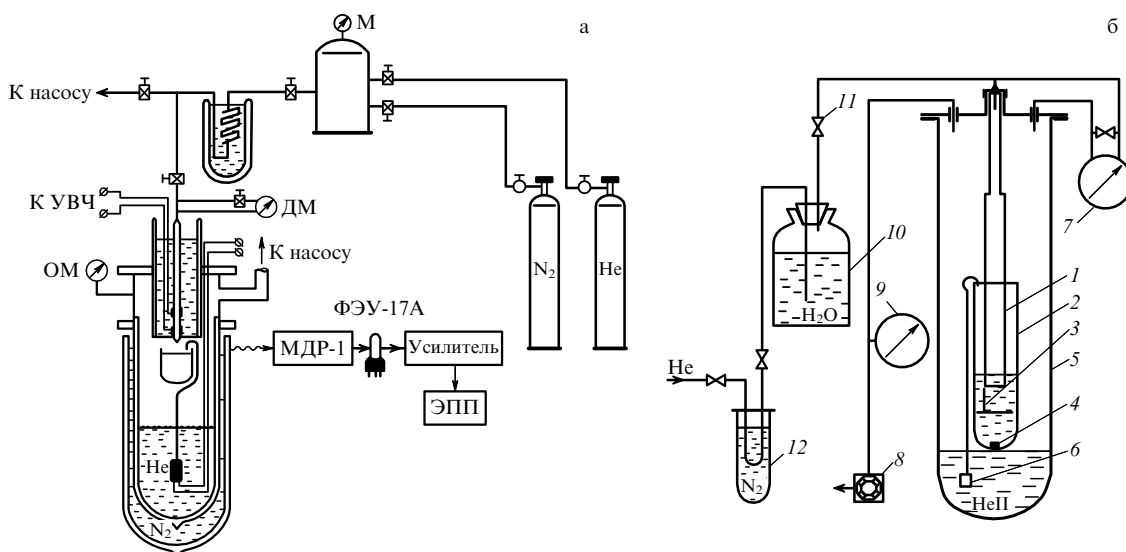


Рис. 1. Приготовление примесь-гелиевых нанокластерных конденсатов: (а) схема установки с ВЧ-диссоциатором, предназначенной для работы с молекулярными и атомарными газовыми примесями [2]: М — манометр, ДМ — дифференциальный манометр, ОМ — образцовый манометр, МДР — дифракционный монохроматор, УВЧ — высокочастотный генератор; (б) схема установки, используемой для работы с парами жидкостей [21]: 1 — трубка набора смеси, 2 — кварцевая ампула, 3 — фторопластовый диск диаметром 30 мм, на котором смонтированы два резистивных термометра, 4 — испаритель, 5 — стеклянный гелиевый дьюар, 6 — термомеханический насос, используемый для набора HeII в ампулу, 7 — дифференциальный манометр, 8 — механический насос, 9 — манометр, 10 — сосуд с водой, 11 — вентиль набора газовой смеси, 12 — азотная ловушка.

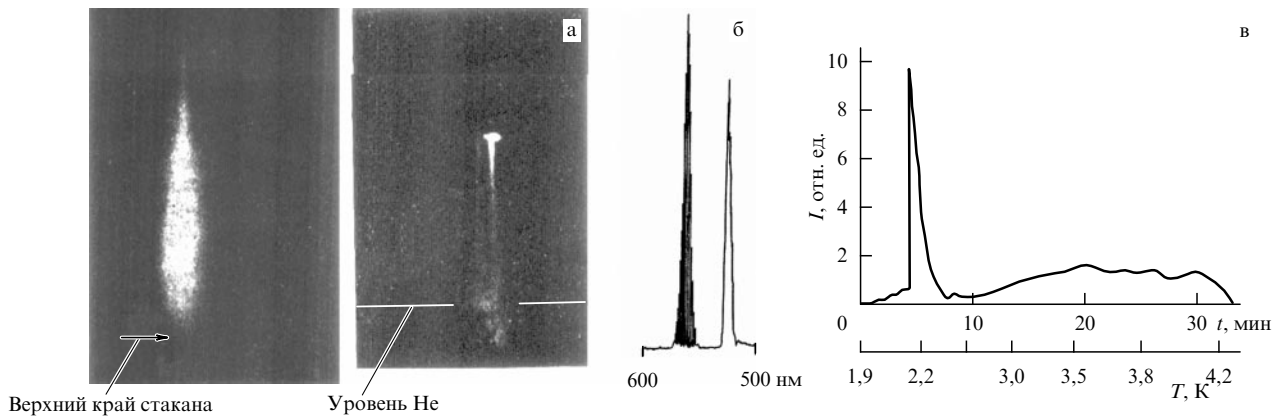


Рис. 2. (а) Эволюция формы газовой струи, содержащей атомы и молекулы азота, при повышении уровня HeII в верхнем стакане (рис. 1а): левый кадр — расстояние от выходного отверстия диссоциатора до уровня HeII около 4 см; правый кадр — расстояние уменьшено до 3 см; температура жидкости $\sim 1,7$ К, давление в диссоциаторе на ~ 10 торр выше давления паров гелия в дьюаре, состав исходной газовой смеси He–N₂ близок к 100 : 1. (б) Спектр свечения смеси азот–гелий в дьюаре во время приготовления образца: видны линии спектра газовой струи (модулированы) и непрерывное свечение конденсата в объеме HeII. (в) Послесвечение конденсата, содержащего атомы азота, при повышении температуры жидкого гелия (люминесценция на длине волны ~ 523 нм).

выходным отверстием разрядной трубки. Для заполнения стакана сверхтекучим HeII используют термомеханический насос. Температура жидкости $T \approx 1,5$ К. Давление газа на входе в диссоциатор на несколько торр превосходит давление насыщенных паров ^4He в объеме криостата. Минимальное расстояние от выходного отверстия диссоциатора до уровня HeII в стакане $h = 2$ см. Форма и цвет газовой струи существенно зависят от этого расстояния. При $h \leq 3$ см струя приобретает форму иглы (рис. 2а), острие которой упирается в конусообразный мениск, образующийся на поверхности HeII. В экспериментах с азотом сама струя и медленно оседающий в объеме сверхтекучей жидкости на дно стакана азотный конденсат светятся зеленым светом [1–3, 6, 15]. При больших расстояниях ($h > 3$ см) вместо иглы наблюдается расширяющийся книзу оранжевый факел, т.е. в более теплой струе преобладает рекомбинационное свечение возбужденного ^4He [11, 25].

Свечение азотного конденсата в объеме HeII затухает только через несколько десятков секунд после прекращения набора примеси и возобновляется при отогреве жидкости выше T_λ (рис. 2в). Чтобы разделить рекомбинационное свечение в газовой струе и свечение конденсата, наблюдаемое в процессе приготовления образца, мощность СВЧ-генератора, соединенного с газоразрядной трубкой диссоциатора, можно модулировать с частотой в несколько герц. Это приводит к модуляции свечения газовой струи (рис. 2б). Зеленое свечение газовой струи и конденсата связано, в основном, с рекомбинацией атомов азота $\text{N} + \text{N} \rightarrow \text{N}_2$ и релаксацией возбужденных молекул азота в азотной матрице, так что в согласии с данными современных наблюдений [6, 8, 15] примесные нанокластеры, содержащие атомы и молекулы вводимой примеси, образуются еще в струе над поверхностью жидкости. Как показали дальнейшие исследования, сформированные в HeII образцы примесь-гелиевых конденсатов могут существовать не только в сверхтекучей HeII, но и в нормальной жидкости HeI (рис. 2в). Температура распада образцов, извлеченных из жидкого гелия, существенно зависит от давления паров ^4He . Например, при атмосферном давлении в дьюаре примесные конден-

саты молекулярных газов быстро распадаются (сублимируют) при нагреве выше 7 К.

Описанная выше методика приготовления примесно-гелиевых образцов используется в экспериментах по изучению строения гелей методами рентгеновской дифрактометрии и по затуханию ультразвуковых колебаний, при изучении туннельных химических реакций в образцах, содержащих свободные радикалы, методами ЭПР и в оптических исследованиях механизмов формирования кластеров и нанокластерного конденсата и релаксации возбужденных гелиевых молекул в HeII. К недостаткам этой методики следует отнести трудность контроля за процессами, происходящими в период образования и накопления конденсата (направленная газовая струя сильно перемешивает жидкость и конденсат, образующийся в стакане), а также большие потери примеси в процессе приготовления образца, поскольку значительная часть вводимого в дьюар газового потока уносится вместе с гелиевым паром в наружную линию откачки. Кроме того, во избежание закупорки выходного отверстия диссоциатора здесь можно использовать только те примеси, температура конденсации которых заведомо ниже температуры кипения жидкого азота.

Схема установки, разработанной нами для приготовления и изучения свойств примесных гелей из веществ, которые затвердевают при температурах много выше точки кипения жидкого азота [20–22], например гелей воды (полярная жидкость) или этанола (слабополярная жидкость), показана на рис. 1б. В отличие от установки, представленной на рис. 1а, данная установка позволяет следить за процессами приготовления образцов, их эволюцией и распадом с повышением температуры окружающей жидкости или при понижении уровня HeII, когда образцы находятся в окружении холодного гелиевого пара. Для наблюдения за формированием образцов и последующей их эволюцией используется видеокамера, устанавливаемая снаружи прибора (на схеме не показана). Камера соединена с видеоманитофоном и компьютером, что облегчает дальнейшую обработку информации. Результаты этих наблюдений обсуждаются в разделе 3.2 (см. рис. 5 и 6).

При приготовлении водяного геля газообразный ^4He предварительно проходит через сосуд с водой 10, и далее газовая смесь, насыщенная парами воды, поступает на вход стеклянной трубки набора 1, внутренний диаметр которой в разных экспериментах изменяли от 9 до 25 мм. В "широкой экспериментальной ячейке", показанной на рис. 1б, нижний край трубки 1 погружен в сверхтекучий HeII, охлажденный до температуры $T \sim 1,4$ К.

Как показал опыт работы, оптимальные условия для приготовления образцов примесь-гелиевого водяного конденсата таковы: температура HeII $T \leq 1,5$ К, избыточное давление в струе газа на входе в трубку 1 $\Delta P \leq 0,6$ торр, т.е. на порядок ниже, чем в установке, схема которой приведена на рис. 1а. В этом режиме расход газовой смеси, поступающей в трубку набора из наружной системы, составляет ≤ 5 см³ с⁻¹ газа при нормальных условиях, при этом весь поступающий ^4He конденсируется на поверхности HeII в рабочей ячейке. Равновесная концентрация водяного пара в смеси $^4\text{He} + \text{H}_2\text{O}$ при комнатных температурах составляет $\sim 3\%$, так что за время набора смеси $t \approx 20$ мин в рабочую ячейку поступает $\leq 6 \times 10^{21}$ молекул H_2O , заметная часть которых осажается на стенках в верхней части трубки набора. Визуально можно различить образование двух-трех ледяных поясков шириной в несколько сантиметров в верхней части трубки, которые соответствуют, по-видимому, различным кристаллическим структурам льда (известно, что в тройной точке лед имеет гексагональную структуру, при дальнейшем понижении температуры наблюдается ряд фазовых переходов [28], а при напылении молекул воды на подложку, охлажденную до 10 К, образуется слой аморфного льда). Таким образом, в образцах водяного геля, которые формируются в объеме HeII, содержание воды не превышает 10^{21} мол. см⁻³. Заметим, что в оптимальном режиме приготовления образцов нижняя часть трубки на расстоянии в несколько сантиметров над поверхностью HeII остается прозрачной. Но при понижении уровня HeII в том месте, где ранее располагалась граница раздела фаз, можно видеть возникновение непрозрачного ледяного осадка на стенках трубки, который образуется вследствие распада примесь-гелиевого конденсата в гелиевом паре. Динамику явлений, наблюдающихся на границе раздела фаз пар-жидкость при больших скоростях набора смеси, мы обсудим ниже в разделе 3.2.

3. Основные результаты исследований

3.1. Строение и свойства гелей, образуемых в HeII примесями молекулярных и инертных газов

3.1.1. Структурные исследования. Для оценки характерных размеров примесных кластеров были использованы методы рентгеновской дифрактометрии [8–11]. Эксперименты по изучению рассеяния рентгеновских лучей на частицах, образуемых примесями инертных или молекулярных газов (D_2 , Ne, N_2 , Kr) в плотном гелиевом паре над поверхностью HeII, а также рассеяния на образцах гелей, формирующихся из них в объеме сверхтекучей жидкости, проводили на синхротронном источнике (рентгеновском дифрактометре) Брукхейвенской национальной лаборатории США. Энергия γ -квантов составляла 17,3 кэВ в экспериментах с неоном и 8 кэВ в экспериментах с другими образцами. Один из результа-

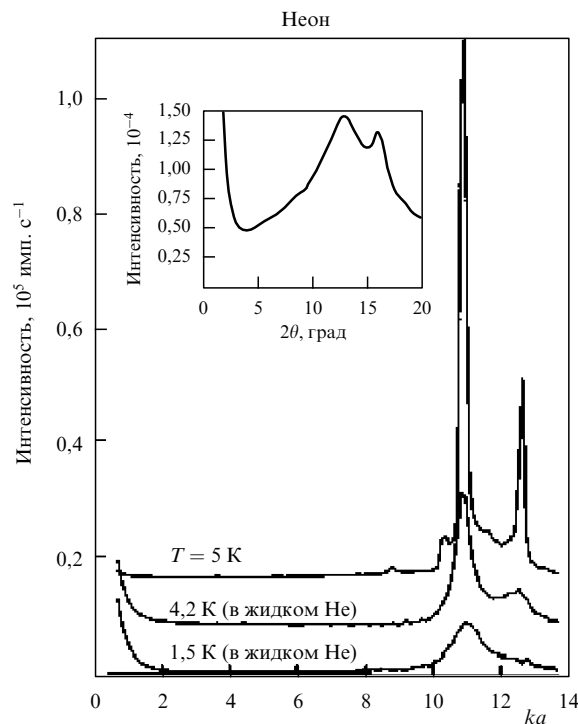


Рис. 3. Рассеяние рентгеновских лучей на неоновом образце, погруженном в жидкий гелий. На вставке показан полный спектр. На нижних графиках фон, соответствующий рассеянию на жидком гелии, вычтен. Здесь a — постоянная решетки твердого неона, k — переданный импульс. Положение пика определяется величиной постоянной решетки, ширина пика — размерами кластера. По оценкам авторов [8, 10], характерные размеры кластера $d_{\text{mean}} \sim 6$ нм (аналогичные оценки для дейтериевого образца дают $d_{\text{mean}} \sim 9$ нм).

тов подобных исследований — угловая зависимость интенсивности рассеянных лучей на образце неоновом геля в жидком гелии при различных температурах образца, приведена на рис. 3. Положение пика определяется величиной постоянной решетки a , ширина пика — размерами кластера d . По оценкам авторов, характерные размеры кластеров неона $d_{\text{mean}} \sim 6$ нм; аналогичные оценки, например, для дейтериевого образца дают $d_{\text{mean}} \sim 9$ нм. Следует отметить, что в действительности разброс в размерах частиц, попадающих на поверхность жидкости, довольно велик — от отдельных атомов или молекул до кластеров, диаметр которых более чем на порядок превосходит указанные характерные размеры d_{mean} . В принципе, по результатам изучения неупругого рассеяния рентгеновских лучей на образце примесь-гелиевого конденсата в HeII можно судить и о характерных размерах пор в наноконденсате. По оценкам, приводимым в работах [8, 11], размеры пор в неоновом образце лежали в диапазоне от 8 до ≥ 400 нм.

Более подробные сведения об эффективных размерах пор в наноконденсатах и эволюции внутренней структуры свежеприготовленных образцов с повышением температуры HeII были получены в экспериментах по изучению прохождения ультразвуковых волн через ячейку, заполненную исследуемым конденсатом. Методика измерений затухания звука в образцах гелей D_2 , Ne, N_2 или Kr подробно обсуждается в работе [9]. Обнаружено, что скорость звука в гелях близка к скорости звука в чистом HeII, однако затухание ультразвуковых волн в

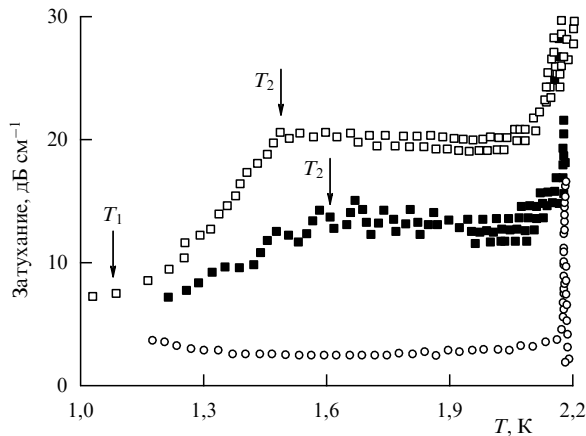


Рис. 4. Затухание ультразвука в объеме экспериментальной ячейки: открытые кружки — чистый HeII, закрытые и открытые квадраты — азотный гель, измерения на частотах 3,16 и 5,33 МГц; T_1 — температура, ниже которой основной вклад в затухание вносит объем сверхтекучего гелия; T_2 — температура выхода затухания на плато. Возрастание затухания звука в диапазоне температур от T_1 до T_2 авторы [9] связывают с падением глубины вязкого проникновения $d_{\text{visc}} = (2\eta/\omega\rho_n)^{1/2}$. Плато при $T > T_2$ соответствует распространению звука в основном, по большим каналам в геле. Характерные размеры пор в данном образце, оцениваемые по значениям d_{visc} при T_1 и T_2 , составляют 8–800 нм.

гелях на порядки выше, чем в жидкости, и сильно возрастает с повышением температуры. Результаты измерений затухания ультразвука в образце азотного геля в объеме жидкого гелия на двух частотах приведены на рис. 4. Открытые кружки — чистый гелий; закрытые и открытые квадраты — гелий с N_2 -He-конденсатом, измерения проведены на частотах 3,16 и 5,33 МГц. Здесь T_1 — температура, ниже которой основной вклад в затухание вносит объем сверхтекучего гелия; T_2 — температура выхода зависимости затухания от температуры на плато.

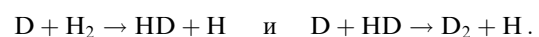
Возрастание затухания звука в диапазоне температур от T_1 до T_2 авторы связывают с падением глубины вязкого проникновения $d_{\text{visc}} = (2\eta/\omega\rho_n)^{1/2}$. Здесь η — вязкость, ω — частота звуковых колебаний и ρ_n — плотность нормальной компоненты. Плато при $T > T_2$ соответствует распространению звука в основном по большим каналам в геле. Характерные размеры пор в данном образце, оцениваемые по значениям d_{visc} при T_1 и T_2 , составляют 8–800 нм. При повышении температуры жидкости выше T_2 и последующем охлаждении затухание звука в образцах различных гелей заметно возрастает, что можно связать с необратимым увеличением размеров нанокластерных агрегатов и повышением средней плотности образцов при повышении температуры.

Эти результаты согласуются с наблюдениями возникновения свечения азотного конденсата, содержащего свободные атомы N, при повышении температуры жидкости (рис. 2в), а также с зарегистрированным нами [22] плавном уменьшении видимых размеров образцов водяного или этанолового геля — айсбергов, плававших под поверхностью жидкости, при возрастании температуры HeII выше 1,6 К. Все эти изменения можно приписать агрегации кластеров малых размеров, контролируемой процессами термоактивированной диффузии молекул или атомов на поверхности кластеров.

3.1.2. Исследования диффузии атомов и туннельных химических реакций в примесь-гелиевых конденсатах в HeII методами ЭПР. Исследования свойств образцов примесных гелей, содержащих атомы азота, водорода и дейтерия, методами электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) проводили в цилиндрической кварцевой ячейке на частотах порядка 9 ГГц (см. работы [10–14] и литературу в них). Рассеиваемая в резонаторе мощность не превышала нескольких микроватт. Регистрировали поглощение СВЧ-излучения атомами N, H или D в образцах различного состава. Численные оценки содержания атомов в исследуемом образце и изменения их относительных концентраций со временем или при повышении температуры жидкости проводили по результатам сравнения ЭПР-спектров исследуемых образцов и стандартных тестовых образцов в том же резонаторе. Результаты изучения свойств азотных гелей продемонстрировали возможность приготовления образцов, содержащих до 10^{21} молекул N_2 в 1 см^3 в объеме образца, при этом *локальная плотность* атомов азота в молекулярном каркасе достигала 10 % (порядка 4×10^{20} атомов см^{-3}).

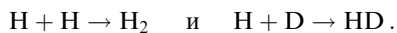
Наиболее интересные результаты были получены при изучении диффузии атомов водорода и дейтерия и туннельных химических реакций в образцах, приготовленных конденсацией в сверхтекучем гелии при температурах $T \sim 1,35\text{--}1,5$ К диссоциированных газовых смесей, содержащих атомы и молекулы водорода и дейтерия [4, 11–14]. Исходное содержание примеси в пучке $[H_2]:[D_2]:[He]$ в разных экспериментах варьировали в широких пределах от 1:20:400 до 1:1:100. Среднее содержание молекул примесей в дейтеро-водородных гелях примерно одинаково — порядка 10^{20} см^{-3} . Однако средняя концентрация атомов H и D в свежеприготовленных образцах сильно зависит от состава исходной смеси и может изменяться со временем или при повышении температуры образцов. Например, в образце, приготовленном из смеси оптимального состава 1:4:100 при $T = 1,5$ К и затем охлажденном до $T = 1,35$ К, содержание атомов водорода со временем монотонно *возрастало* (почти вдвое за 500 мин) и достигало значений $(7,5 \pm 3,0) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, при этом содержание атомов дейтерия в исходном образце было в несколько раз выше, чем водорода, но со временем *падало* в 1,5–2 раза (содержание атомов дейтерия в этом образце составляло $\sim 1,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Длительные наблюдения за изменением содержания атомов H и D в одном из образцов оптимального состава с высокой концентрацией атомарного водорода ($\sim 5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$) при $T = 1,35$ К [14] показали, что за последующие 40 ч концентрация атомов водорода практически *не изменилась*, а концентрация атомов дейтерия *упала* на $\sim 2,5$ порядка по сравнению с начальной концентрацией $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Возрастание содержания атомов водорода и одновременное убывание содержания атомов дейтерия в образцах оптимального состава указывает на то, что в этих образцах преобладают туннельные реакции обмена

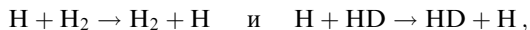


В то же время в образце, приготовленном из смеси $[H_2]:[D_2]:[He]$ с содержанием компонент 1:2:60, где начальное содержание атомов H втрое выше, чем в предыдущей смеси, и превосходит содержание атомов

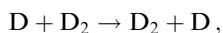
D, со временем концентрации атомов H и D монотонно *убывают*, т.е. возрастание содержания атомов водорода за счет реакций обмена компенсируется рекомбинацией атомов, оказавшихся в соседних узлах твердого каркаса дейтеро-водородного геля:



Миграция атомов водорода по образцу происходит за счет реакций обмена



а миграция атомов дейтерия контролируется реакцией обмена



которая протекает со скоростью, на четыре порядка *меньшей* скорости реакции обмена водорода. Поэтому подвижность свободных атомов водорода в дейтеро-водородных гелях намного превосходит подвижность дейтериевых атомов.

Наблюдения спутанных линий на ЭПР-спектрах поглощения СВЧ-излучения атомами H и D указывают на то, что атомы H и D стабилизируются в кластерах, из которых формируются примесные конденсаты смесей H_2 , D_2 и HD. В частности, каждый атом H окружен слоем молекул D_2 , что препятствует рекомбинации атомов водорода. Атом водорода, окруженный оболочкой из молекул D_2 , *становится стабильным*, так как он не может ни мигрировать через оболочку, ни взаимодействовать с молекулами D_2 по реакции $\text{H} + \text{D}_2 \rightarrow \text{HD} + \text{D}$, поскольку эта реакция *эндотермична*.

Воспользовавшись результатами этих измерений и результатами предыдущих рентгеноструктурных исследований, авторы работы [14] оценили, что *локальная* концентрация атомов H *внутри кластеров* HD– D_2 может достигать $\sim 10^{20}$ атомов $\text{H} \text{ см}^{-3}$, т.е. относительная концентрация атомов водорода в кластерах может быть порядка 1%. Отсюда следует, что в кластере, содержащем примерно 10^4 молекул D_2 и HD, может находиться около 10^2 атомов H и среднее расстояние между атомами водорода составляет ~ 2 нм. Это позволяет надеяться на обнаружение кооперативных квантовых эффектов при охлаждении дейтеро-водородного геля с высоким содержанием атомов H до температуры порядка 100 мК.

Отметим, что в образцах, приготовленных из диссоциированного чистого дейтерия [13], характерные размеры кластеров составляли 9 ± 3 нм, объемное содержание молекул D_2 достигало $7 \times 10^{20} - 3 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, содержание атомов D в геле — порядка $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, так что *локальное* содержание атомов дейтерия *в кластерах* достигало $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

3.1.3. Оптические исследования свечения конденсатов молекулярных газов. Экспериментальная ячейка, которую использовали для изучения эмиссии газовой струи, содержащей атомы азота, а также эмиссии азот-гелиевого конденсата в объеме HeII при температурах $T \sim 1,5 - 1,7$ К, подробно описана в работе [15]. Для разделения процессов, происходящих в газовой струе и в конденсированной фазе, авторы модулировали мощность высокочастотного генератора, питающего диссоциатор (длительность ВЧ-импульсов порядка 200 мкс,

частота повторения 500 Гц). В работе регистрировали свечение атомов азота в зеленой области спектра ($\sim 520 - 525$ нм), а также свечение возбужденных молекул азота, образующихся при рекомбинации атомов, в голубой области спектра ($\sim 240 - 360$ нм). Оба этих перехода запрещены в газовой фазе, поэтому подобные наблюдения могут служить в качестве тестовых при изучении процессов формирования примесных кластеров в газовой струе непосредственно над поверхностью жидкости и образования примесь-гелиевого конденсата на поверхности и в объеме жидкости. Обнаружено, что наиболее интенсивное излучение наблюдается в области кратера, который возникает на поверхности жидкости под действием газовой струи, движущейся со скоростью $\sim 70 \text{ м с}^{-1}$. Это указывает на то, что процессы агрегации примеси, сопровождаемые образованием кластеров и рекомбинацией атомов азота в объеме кластера, наиболее интенсивно происходят в плотном гелиевом паре над поверхностью жидкости. В объеме жидкости интенсивность излучения быстро падает с глубиной даже на расстояниях в несколько миллиметров от поверхности кратера. Спектры молекулярного излучения в газовой струе, на поверхности кратера и в объеме жидкости выглядят одинаково и сдвинуты в красную область по сравнению с известным спектром излучения одиночных молекул в газовой фазе. Точно так же спектры излучения атомарного азота в струе над поверхностью жидкости, на поверхности кратера и в объеме жидкости оказались подобными, так что во всех случаях существенную роль играют процессы, происходящие внутри примесных кластеров в газовой струе или в наноконденсате, образующемся при коалесценции наночастиц в объеме жидкости, а не излучение отдельных изолированных атомов или молекул. По известной скорости движения газовой струи можно оценить, что в объеме кластеров, проникающих в объем жидкости, содержится $\sim 10^3$ молекул N_2 , так что характерные размеры кластеров составляют ~ 3 нм. Эти оценки по порядку величины согласуются с приведенными выше данными.

В развитие этих исследований в следующей работе [25] изучали флуоресценцию, связанную с релаксацией метастабильных атомов гелия и эксимерных гелиевых молекул, которые образуются при пропускании через диссоциатор струи чистого ^4He , а также тушение люминесценции при введении в гелиевую струю примеси водорода. Измерения проводили в интервале 580–720 нм. Обнаружено, что возбужденные атомы He в триплетном состоянии и эксимерные молекулы скапливаются в области кратера на поверхности HeII. Наблюдения генерации излучения в объеме жидкости могут быть связаны с реакциями, происходящими на поверхности жидкости, — рекомбинацией возбужденных атомов и эксимерных молекул, сопровождаемой возникновением ионов гелия и электронов на поверхности. Последующая электрон-ионная рекомбинация приводит к генерации высоковозбужденных состояний атомов и эксимерных молекул на поверхности кратера и в объеме жидкости. Тушение люминесценции при введении в газовую струю примеси водорода может быть объяснено эффективной передачей энергии от He к молекулам H_2 .

3.2. Водяной и этаноловый гели в HeII

Вода — основа органической жизни во вселенной, и удивительно, что обнаружение следов воды в любой

форме на далеких планетах сразу же привлекает внимание ученых разных специальностей. Нас заинтересовала возможность существования новой формы воды — примесь-гелиевого водяного конденсата (водяного геля) при низких температурах. Как показали наши эксперименты [19–24], введение в сосуд со сверхтекучим HeII газообразного ^4He с примесью паров воды действительно приводит к образованию на границе раздела фаз пар – жидкость полупрозрачного конденсата — водяного геля, существующего только при температурах жидкого гелия. Строение водяного геля до сих пор не выяснено, хотя по аналогии с конденсатами молекулярных газов можно полагать, что каркас этого геля образуют нанокластеры типа $(\text{H}_2\text{O})_n$, окруженные одним-двумя слоями отвердевшего ^4He . В пользу этого предположения говорят результаты работы [29], где сообщалось о наблюдении водяных нанокластеров (от димеров до гексамеров) внутри гелиевых капель диаметром порядка 50 нм, которые пролетали через сосуд, заполненный парами воды. Схема установки, используемой для приготовления гелей воды и этанола в сверхтекучем HeII, приведена на рис. 16. При отработке методики приготовления и выяснении области существования образцов водяного и этанолового гелей исследования проводили в нескольких ячейках различных конструкций. В частности, при изучении области существования водяного геля в экспериментах с "узкой ячейкой" [19–21] нижний край трубки набора внутренним диаметром 9 мм был запаян. На дне трубки было сделано проходное отверстие диаметром 1,5 мм, которое служило для набора сверхтекучего гелия в рабочую ячейку из наружной стеклянной пробирки.

Оптимальные условия приготовления образцов таковы: температура жидкости $T = 1,4$ К, избыточное давление в газовом потоке на входе трубки набора $\Delta P \leq 0,6$ торр, расход газа $\leq 3 \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$. Формирующееся в трубке на границе раздела фаз пар – жидкость полупрозрачное облако (желеобразный конденсат) медленно смещается вдоль стенок трубки в объем HeII. Набор прекращали, когда толщина облака сравнивалась с диаметром ячейки. При постоянной температуре жидкости за время ~ 10 мин облако трансформировалось в овальный образец (айсберг) со средним диаметром, близким к диаметру ячейки, который плавал под поверхностью жидкости. При плавном понижении уровня HeII в момент, когда верхний край айсберга оказывался выше уровня жидкости, можно было наблюдать, что айсберг скачком смещался вниз (нырнул) и вновь зависал под поверхностью HeII. Температура HeII в ячейке при этом практически не изменялась, зато отмечались скачки давления, т.е. скачкообразное смещение айсберга можно объяснить истечением холодной газовой струи вверх от выступающей поверхности образца, подогреваемого внешним источником света (водяной конденсат поглощает видимый свет гораздо сильнее, чем жидкий гелий и стенки стеклянной трубки).

Повторяя набор, можно было приготовить несколько айсбергов, располагавшихся один над другим вдоль ячейки. Это позволило изучить эволюцию формы и распад айсбергов при последующем повышении температуры окружающей жидкости, а также наблюдать процессы распада извлеченных из HeII "сухих" айсбергов в гелиевом паре при давлениях свыше нескольких торр. Оказалось, что при испарении HeII из ячейки температура "сухих" айсбергов, которые собираются на

дне ячейки, монотонно возрастает от $\sim 1,4$ до 1,8 К в течение довольно длительного промежутка времени (10–20 мин в зависимости от яркости наружного освещения). При этом показания установленных в ячейке верхнего и нижнего термометров практически совпадают. Выше 1,8 К показания термометров начинают заметно расходиться, наблюдаются резкие скачки температуры амплитудой до 0,3 К. Скачки температуры сопровождаются растрескиванием айсбергов и уменьшением их объема. При T более 2,2 К скачки прекращаются, а температура гелиевого пара внутри ячейки быстро увеличивается выше 4 К. Суммарный объем льдинок, которые образуются на дне и стенках ячейки при распаде айсбергов, примерно на два порядка меньше объема исходных айсбергов. Следовательно, содержание воды в объеме айсбергов не превосходит нескольких процентов, так что концентрация воды в объеме айсберга не превосходит 10^{20} молекул см^{-3} , что согласуется с приводимой выше оценкой содержания воды в газе, который был сконденсирован на поверхности HeII в процессе набора смеси. В этом эксперименте температура жидкости в дьюаре поддерживается постоянной ($T \sim 1,4$ К), соответственно и давление паров гелия в дьюаре постоянно и составляет $P \sim 2$ торр, но уровень HeII расположен ниже дна рабочей ячейки, поэтому ячейка с конденсатом постепенно нагревается. При повышении давления паров гелия в дьюаре до атмосферного температура распада "сухих" айсбергов возрастает до ~ 4 К. Распад "сухих" айсбергов сопровождается интенсивным истечением газообразного ^4He через сопло в нижней части трубки набора. Следовательно, внутри айсбергов, извлеченных из HeII, заключено довольно большое количество жидкого гелия, который испаряется при нагреве конденсата внешним источником света до 1,8 К (для сравнения: по данным масс-спектрального анализа состава газа, образующегося при распаде извлеченных из жидкости молекулярных примесь-гелиевых конденсатов [7], на одну молекулу примеси приходится до 12 атомов He, что поддерживает идею возникновения примесных ван-дер-ваальсовых комплексов в плотном гелиевом паре).

Исследования эволюции формы и распада айсбергов в жидком гелии при повышении температуры окружающей жидкости показали, что айсберги могут существовать и при температурах выше T_λ в объеме нормальной жидкости HeI. Температура T_p , при которой наблюдается выделение газообразного гелия из образца и активный распад (таяние) айсберга в нормальном гелии HeI, сильно зависит от давления паров в приборе. При $P \approx 0,2$ атм температура начала распада $T_p \approx 2,5$ К, а с повышением давления до 1 атм она возрастает до $T_p \approx 4$ К.

При большой скорости набора ($\Delta P \geq 1$ торр) через несколько минут после начала набора смеси первоначально плоская граница раздела фаз жидкость – пар искривлялась, на границе раздела фаз был четко виден мениск, высота которого достигала ~ 1 мм, т.е. от стенок трубки к центру вдоль поверхности HeII начинал нарастать прозрачный слой водяного геля толщиной порядка 1 мм. При продолжении набора в момент, когда слой перекрывал всю поверхность HeII, давление в трубке скачком возрастало в десятки раз ($\Delta P \geq 20$ торр), что приводило к выталкиванию слоя конденсата и жидкости, заполнявшей трубку, в наружную пробирку. Продавли-

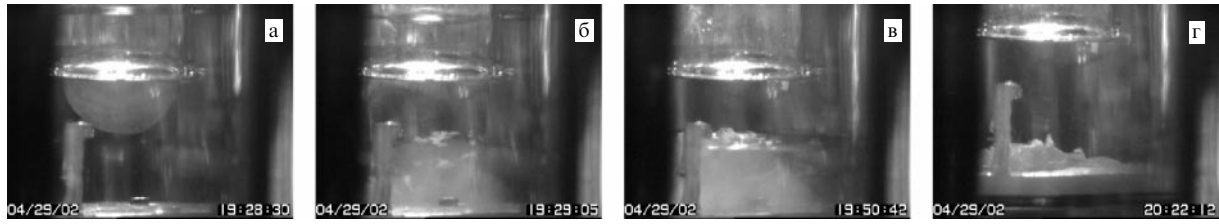


Рис. 5. Формирование водяного геля в HeII и распад образца при понижении уровня HeII в экспериментальной ячейке, показанной на рис. 1б. Температура жидкости постоянна ($T = 1,4$ К). На фотографиях виден нижний край трубки набора смеси (1 на рис. 1б), термометр, укрепленный на стальной игле на расстоянии в 1 см над тефлоновой подложкой, и термометр, расположенный на поверхности подложки. Кадры слева направо: (а) облако водяного геля на выходе из трубки набора; (б) слой геля, образовавшийся при падении облака на подложку (уровень HeII выше края трубки 1); (в) эволюция формы образца с понижением уровня жидкости (уровень HeII ниже верхнего термометра) и, наконец, (г) распад водяного геля в парах ^4He (уровень жидкости ниже подложки, температура подложки $T \sim 2,18$ К и повышается до $T \sim 2,6$ К на расстоянии в 1 см над подложкой, давление паров в дюаре $P \sim 2,2$ торр).

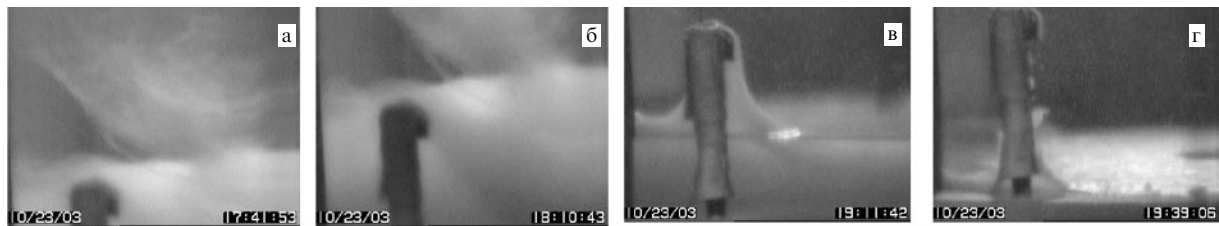


Рис. 6. Формирование дейтериевого геля в HeII и распад образца при понижении уровня HeII в экспериментальной ячейке, показанной на рис. 1б. Температура жидкости постоянна ($T = 1,4$ К). Кадры а, б — формирование образца; в, г — распад при понижении уровня жидкости.

вание (экструзия) образца водяного геля через 1,5-миллиметровое отверстие на дне ячейки сопровождалось распадом геля — на дне наружной пробирки собирался мелкозернистый порошок (по-видимому, аморфный лед), свойства которого не изменялись при испарении жидкости и последующем росте температуры выше 7 К. Аналогичные результаты были получены в серии предварительных экспериментов с этаноловым гелем, образцы которого оказались менее стабильными, чем образцы водяного геля, а также в экспериментах с дейтериевым гелем.

В связи с подготовкой к проведению совместных экспериментов (ИФТТ, Черногловка; ОИЯИ, Дубна; ИЛЛ, Гренобль) по изучению строения гелей из слабо поглощающих нейтроны веществ, в первую очередь гелей дейтерия и тяжелой воды, методами нейтронной спектроскопии [22–24, 26, 27], где требуются образцы объемом более 10 см^3 , диаметр рабочей ячейки был увеличен до 3 см, соответственно увеличили и диаметр трубки набора смеси. Один из вариантов устройства этой ячейки показан на рис. 1б. Результаты наблюдений особенностей формирования и распада водяного геля в широкой ячейке приведены на рис. 5. Температура жидкости была постоянна ($T = 1,4$ К), так что давление паров гелия в дюаре составляло $P \sim 2$ торр. На приводимых фотографиях виден нижний край трубки набора смеси, верхний термометр, укрепленный на стальной игле на расстоянии в 1 см от поверхности тефлоновой шайбы (подложки), и нижний термометр, установленный на поверхности в центре шайбы. При малой скорости набора смеси на стенках широкой трубки формируется полупрозрачное облако конденсата, которое медленно опускается вниз в рабочую ячейку. На кадре (а) видно овальное облако конденсата на выходе из трубки набора

смеси. Далее (б) виден слой конденсата, образовавшийся при опускании облака на поверхность шайбы. Уровень HeII расположен на ~ 1 см выше края трубки набора. Следующий кадр (в) иллюстрирует эволюцию формы образца, лежащего на подложке, с понижением уровня HeII: выступающая над поверхностью жидкости часть айсберга постепенно распадается. Наконец, на последнем кадре (г), где уровень жидкости на ~ 1 см ниже шайбы, а температура подложки выросла до 2,6 К, видны отдельные льдинки, образовавшиеся в результате распада образца водяного геля. На рисунке 6 показан пример наблюдений формирования и распада дейтериевого образца в тех же условиях (масштаб кадров увеличен в $\sim 1,5$ раза).

Отметим, что при большой скорости набора смеси в широкой ячейке так же, как и в узкой, наблюдается нарастание слоя конденсата вдоль границы раздела пар–жидкость, сопровождающееся скачком давления и выталкиванием слоя конденсата из широкой трубки в наружную пробирку в момент, когда слой полностью перекрывает всю поверхность жидкости в трубке набора. Поэтому в новом варианте криостата, предназначенного для проведения совместных исследований структуры гелей тяжелой воды и дейтерия на нейтронном пучке ИЛЛ [24], предусматривается возможность принудительного выталкивания нарастающего слоя конденсата из трубки набора в рабочую ячейку в процессе приготовления образца. Результаты этих исследований будут использованы в дальнейшем для разработки установки, предназначенной для проверки возможности реализации нового метода накопления и хранения ультрахолодных нейтронов в примесных гелях в сверхтекучем HeII, охлажденном до температуры порядка нескольких милликельвинов [23, 24, 26, 27].

4. Заключение

Перечислим основные результаты проведенных исследований.

1. Разработана методика приготовления новых нанокластерных материалов в сверхтекучем гелии — стабильных при низких температурах примесь-гелиевых конденсатов молекулярных и атомарных газов (примесных гелей), в том числе образцов, содержащих атомы (свободные радикалы) молекулярных газов.

2. Свойства примесь-гелиевых образцов, полученных конденсацией молекулярных и атомарных (инертных) газов, исследованы методами синхротронной рентгеновской дифрактометрии, масс-спектрометрии, ЭПР, оптической и ультразвуковой спектроскопии. Можно считать установленным, что дисперсионной системой (каркасом) формирующегося в HeII примесь-гелиевого конденсата (геля) служат примесные кластеры, окруженные одним-двумя слоями отвердевшего гелия, а дисперсионной средой — сверхтекучий HeII, проникающий в поры. Средние размеры кластеров порядка 5–10 нм, характерные размеры пор в образце составляют 5–1000 нм. Суммарное содержание примеси в объеме свежеприготовленного образца $N \leq 10^{21}$ атомов или молекул см^{-3} , так что средняя плотность геля не более чем на проценты выше плотности окружающей жидкости. Локальное содержание атомов азота N в молекулярном каркасе азотного геля N_2 достигает $4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$; локальное содержание атомов водорода H в каркасе дейтериеводородного геля D_2 –HD может достигать 10^{20} см^{-3} .

3. Разработана методика приготовления примесь-гелиевых конденсатов из веществ, температура перехода которых в жидкое состояние много выше температуры кипения жидкого азота, и проведены исследования свойств образцов водяного и этанолового гелей при температурах выше 1,4 К. Установлена область существования этих образцов в жидком гелии и в гелиевом паре. Согласно оценкам суммарное содержание молекул H_2O или $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ в объеме свежеприготовленного образца геля $\leq 10^{20} \text{ см}^{-3}$, так что плотность водяного и этанолового гелей близка к плотности гелей на базе молекулярных или инертных газов. Проведены рабочие испытания нового металлического криостата, предназначенного для изучения структуры гелей методами нейтронной спектроскопии.

Насколько нам известно, планы ближайших исследований, проводимых в различных лабораториях, включают углубленное изучение туннельных химических реакций в матрично-изолированных конденсированных системах при низких и сверхнизких температурах, в частности, попытку обнаружения кооперативных квантовых эффектов в дейтеро-водородных конденсатах с большим содержанием атомов водорода, исследования возможности использования примесных наноконденсатов в качестве низкотемпературных источников энергии

и катализаторов, а также изучение возможностей применения гелей тяжелой воды и дейтерия в качестве эффективных замедлителей холодных нейтронов, пригодных для накопления и хранения ультрахолодных нейтронов в сосуде, заполненном сверхтекучим HeII при температурах порядка 1 мК.

Я благодарен авторам работ [4, 15–18] D.M. Lee, V.V. Khmelenko, V. Kiryukhin, J.R. Beamish, S.I. Kiselev, E.P. Bernard, R.E. Boltnev и их коллегам за разрешение использовать рис. 3 и 4, иллюстрирующие некоторые из результатов их исследований строения примесных гелей.

Исследования свойств водяных гелей проводятся в ИФТТ РАН в рамках программы ГНТ "Актуальные направления в физике конденсированных сред", поддерживаемой Министерством образования и науки РФ. Совместные исследования проводятся в ИЛЛ (Гренобль, Франция) при поддержке руководства ИЛЛ.

Список литературы

1. Гордон Е Б, Межов-Деглин Л П, Пугачев О Ф *Письма в ЖЭТФ* **19** 103 (1974)
2. Гордон Е Б и др. *ПТЭ* (6) 247 (1975)
3. Гордон Е Б и др. *ЖЭТФ* **73** 952 (1977)
4. Khmelenko V V et al. *Phys. Scripta* **T102** 118 (2002)
5. *Образование и стабилизация свободных радикалов* (Под ред. А Басса, Г Бройды) (М.: ИЛ, 1962)
6. Boltnev R E et al. *J. Chim. Phys.* (France) **92** 362 (1995)
7. Болтнев Р Е и др. *ФНТ* **23** 753 (1997)
8. Kiryukhin V et al. *Phys. Rev. Lett.* **79** 1774 (1997)
9. Kiselev S I et al. *J. Low Temp. Phys.* **119** 357 (2000)
10. Kiselev S I et al. *Phys. Rev. B* **65** 024517 (2002)
11. Kiselev S I et al. *ФНТ* **29** 678 (2003); Bernard E P et al. *J. Low Temp. Phys.* **134** 169 (2004)
12. Kiselev S I, Khmelenko V V, Lee D M *Phys. Rev. Lett.* **89** 175301 (2002)
13. Bernard E P et al. *Phys. Rev. B* **69** 104201 (2004)
14. Bernard E P et al. *J. Low Temp. Phys.* **138** 829 (2005)
15. Popov E A et al. *ФНТ* **29** 684 (2003)
16. Shal'nikov A I, Semenov N N, Khariton Yu V *Trans. Farad. Soc.* **28** (3) 169 (1932)
17. Шальников А И, Харитон Ю Б *Механизм конденсации и образования коллоидов* (Л. – М.: Гостехтеориздат, 1934)
18. Savich P, Shal'nikov A J. *Phys. USSR* **10** 299 (1946)
19. Межов-Деглин Л П, Кокотин А М *Письма в ЖЭТФ* **70** 744 (1999)
20. Mezhev-Deglin L P, Kokotin A M *J. Low Temp. Phys.* **119** 385 (2000); **126** 697 (2002); *Physica B* **329–333** 331 (2003)
21. Кокотин А М, Межов-Деглин Л П *ПТЭ* (2) 159 (2001)
22. Кокотин А М, Межов-Деглин Л П *ФНТ* **29** 690 (2003)
23. Межов-Деглин Л П *УФН* **173** 97 (2003)
24. Mezhev-Deglin L P et al., in *Proc. of the 24th Intern. Conf. on Low Temperature Physics: LT-24, Orlando, FL, USA, 10–17 August 2005*; accepted for publications
25. Popov E A et al. *J. Low Temp. Phys.* **138** 85 (2005)
26. Несвижевский В В *ЯФ* **65** 426 (2002)
27. Несвижевский В В *УФН* **173** 102 (2003)
28. Petrenko V F, Whitworth P W *Physics of Ice* (New York: Oxford Univ. Press, 1999)
29. Nauta K, Miller R E *Science* **287** 293 (2000)