

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР
им. Б. И. Веркина

На правах рукописи

УДК 536.48

ШЕШИН Григорий Александрович

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА И КИНЕТИКА ФАЗОВОГО
РАССЛОЕНИЯ В СВЕРХТЕКУЧИХ РАСТВОРАХ ^3He - ^4He ПРИ
СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

01.04.09 - Физика низких температур

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1993



00756869 (+)

Фізико-технічному інституті низких температур АН України ім. В. І. Веркіна.

Научные руководитель: доктор фізико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
РУДАВСКИЙ Э. Я.

Официальные оппоненты: доктор фізико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
МОНАРХА Ю. П.

кандидат фізико-математических наук,
старший научный сотрудник
БОГОЯВЛЕНСКИЙ И. В.

Ведущая организация: Российский Научный центр " Институт
им. И. В. Курчатова ", 123182, Москва.

Защита состоится " 8 " февраля 1994 г. в 15⁰⁰ на заседании
Специализированного Совета К 016.27.02 при Фізико-технічному
інституті низких температур АН України (310164, Харьков, проспект
Ленина, 47, ФТИНТ АН України).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Фізико-техніческого інститута низких температур АН України.

Автореферат разослан " " 1993г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверен-
ной Гербовой печатью, просим направлять по адресу: 310164,
г. Харьков, пр. Ленина, 47, ФТИНТ АН України, Ученому секретарю
Специализированного совета К 016.27.02.

Ученый секретарь
Специализированного Совета

(А. М. Кислов)

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

Актуальность проблемы. Объектом исследования в данной диссертационной работе являются сверхтекучие растворы ^3He - ^4He , которые в области низких и сверхнизких температур образуют набор квантовых жидкостей. Среди большого разнообразия эффектов, наблюдаемых в этой системе, одним из наиболее интересных является фазовый переход I рода - фазовое расслоение растворов на концентрированную и разбавленную фазы. В достаточно широком температурном интервале разбавленную фазу можно рассматривать как раствор нормальной ферми - жидкости в сверхтекучей бозе - жидкости. Еще более экзотическая квантовая система предсказывается, если фермиевская компонента раствора за счет куперовского спаривания перейдет в сверхтекучее состояние. Сам факт наличия фазового перехода I рода позволяет использовать систему ^3He - ^4He для изучения кинетики фазового перехода в области очень низких температур, где возможно проявление квантовых эффектов. С точки зрения техники - фазовое расслоение растворов ^3He - ^4He на две фазы с сильно различающимися термодинамическими характеристиками позволило реализовать один из самых эффективных методов получения сверхнизких температур, основанный на растворении ^3He в ^4He .

Благодаря отмеченным особенностям жидкие растворы ^3He - ^4He в настоящее время продолжают оставаться одной из самых актуальных и активно исследуемых систем в физике низких температур. К началу выполнения данной диссертационной работы практически неизученным был круг вопросов, связанных с кинетикой фазового расслоения растворов, особенно в области сверхнизких температур. Такие исследования чрезвычайно важны, поскольку можно рассчитывать, что в данной системе фазовый переход реализуется в наиболее чистом виде путем гомогенного зародышеобразования, так как в растворах ^3He - ^4He можно легко исключить наличие примесей и влияние поверхностных эффектов. Кроме того, в исследуемой области температур возможно проявление квантовых эффектов. Экспериментальные исследования кинетики фазового перехода в растворах составляют центральную часть диссертации.

Другой круг вопросов, который также требовал экспериментального изучения, был связан с исследованием поведения сверхтекучих растворов ^3He - ^4He при таких температурах и концентрациях, когда основной вклад в кинетические процессы вносят квазичастицы ^3He , а влиянием фоонов и ротонов можно пренебречь. Такое поведение растворов может быть наглядно продемонстрировано на примере акусти-

ческих свойств и затрагивает проблему кинетики примесонной системы растворов. Цикл работ, проведенных в этой области в последние годы в ФТИНТ АНУ, позволил детально изучить кинетику фонон-примесной системы растворов, однако эксперименты в чисто примесной области практически не проводились. Интерес к этой проблеме связан также и с наличием теоретических исследований в этой области, которые требовали экспериментальной реализации. Кроме самостоятельного интереса, акустические исследования сверхтекучих растворов ^3He - ^4He могут также составить основу нового метода экспериментального изучения кинетики фазового расслоения. Изложенные выше обстоятельства определяют актуальность экспериментального исследования кинетики фазового расслоения и акустических свойств сверхтекучих растворов ^3He - ^4He .

Ц е л ь настоящего исследования явилось:

1. Экспериментальное изучение скорости первого звука в примесонной системе сверхтекучих растворов ^3He - ^4He при сверхнизких температурах и сравнение полученных результатов с предсказанием теории.
2. Обнаружение и исследование метастабильных сверхтекучих растворов ^3He - ^4He в широкой области температур и концентраций.
3. Определение допустимых пересыщений и возможных механизмов зародышеобразования при фазовом переходе.
4. Исследование кинетики роста новой фазы.

Научная новизна. При низких и сверхнизких температурах впервые определена область существования метастабильных долгоживущих сверхтекучих растворов, образование которых предшествует фазовому расслоению. Получена температурная зависимость достижимого пересыщения, которая выше 50 мК свидетельствует в пользу термоактивационного механизма зародышеобразования. Изучена кинетика роста новой фазы с помощью одновременных измерений скорости звука и диэлектрической постоянной.

Впервые измерена зависимость скорости первого звука от концентрации сверхтекучего раствора ^3He - ^4He при сверхнизких температурах и показано, что акустические свойства растворов в этой области температур определяются примесонной подсистемой раствора, а влиянием тепловых эффектов можно пренебречь уже ниже 50 мК.

Достоверность результатов диссертации подтверждается следующим:

1. Адекватность использования экспериментальных методик, каждая из которых проверялась с помощью специальных калибровочных измерений.

2. Анализом возможных погрешностей измерений.

3. Хорошей воспроизводимостью данных, полученных в различных сериях измерений.

Научная и практическая значимость работы. Полученные в диссертации новые результаты о кинетике зародышеобразования новой фазы из метастабильного сверхтекучего раствора ^3He в ^4He расширяют представления о фазовом переходе I рода. Обнаруженный термоактивационный механизм зародышеобразования при температурах выше 50мК носит общий характер и проявляется в других системах, имеющих метастабильную фазу.

Новые сведения о величинах достижимых пересыщений, полученные в работе, важны для дальнейшего развития физики фазовых переходов в сверхтекучих растворах ^3He - ^4He , особенно при сверхнизких температурах.

Акустические эксперименты с концентрированными растворами ^3He - ^4He при сверхнизких температурах позволили показать справедливость развитой ранее кинетической теории сверхтекучих растворов о преобладающей роли примесонной системы в их свойствах при сверхнизких температурах.

Экспериментальные исследования скорости первого звука и диэлектрической постоянной позволили наблюдать кинетику роста новой фазы в процессе расслоения. В работе определены времена роста капель новой фазы и времена их всплытия с образованием объемной фазы концентрированного раствора.

Разработанные и созданные в процессе выполнения работы экспериментальные методы и устройства имеют и самостоятельное значение. Рефрижератор растворения, используемый в работе для получения сверхнизких температур, может быть применен для выполнения различных физических исследований. В практике акустических измерений при низких температурах может быть использована методика измерения скорости звука, обеспечивающая минимальные тепловыделения в процессе измерений и гарантирующая высокую точность измерений. Методика непрерывного изменения концентрации, имеющая самостоятельный интерес, может быть использована для исследования любых свойств сверхтекучих растворов. Кроме того, тепловой ключ, применяемый в работе, можно использовать для быстрого охлаждения больших исследуемых объемов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально обнаружено долгоживущее метастабильное состояние сверхтекучих растворов ^3He - ^4He и определена область его существования в широком интервале температур 30-250мК.

2. Измерены значения достижимых пересыщений Δx и показано, что в области температур 50–250 мК имеет место температурная зависимость $\Delta x \sim T^{-1/2}$, характерная для термоактивационного зародышеобразования.

3. Исследована кинетика образования и роста новой фазы в процессе расслоения с помощью одновременных измерений скорости звука и диэлектрической постоянной. Показано, что при этом избыточный ^3He в пересыщенном растворе может находиться как в виде отдельных атомов, так и в виде капель – зародышей новой фазы.

4. Проведены прецизионные измерения скорости первого звука в растворах в области температур 25 – 180 мК и концентраций 0 – 6,5% ^3He и установлено, что полученные концентрационные и температурные зависимости согласуются с кинетической теорией примесной подсистемы растворов.

5. Разработан и апробирован оригинальный метод непрерывного изменения концентрации сверхтекучих растворов непосредственно в ходе эксперимента за счет изменения осмотического давления и давления фонтанирования.

Апробация результатов работы и публикации. Материалы диссертации докладывались на Международных конференциях по физике низких температур: LT-19 (Лондон, Великобритания, 1991) и LT-20 (Юджин, США, 1993), на Международном семинаре по физике квантовых жидкостей и кристаллов (Каржес, Франция, 1993г.), на Международной конференции "Физика на Украине" (Киев, Украина, 1993г.), на Совещании по физике низких температур (Казань, Россия, 1992г.), на 11 Всесоюзной акустической конференции (Москва, 1991г.), на XXVI Всесоюзном совещании по физике низких температур (Донецк, 1990г.), на Республиканских семинарах: IV (Донецк, 1989г.), V (Алушта, 1991), на Научно – технических конференциях молодых исследователей (Харьков, 1989, 1990, 1991г.). Основное содержание работы изложено в 20 научных работах.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с 25-ю рисунками и 2-я таблицами, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 116 страниц машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность, цель работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научное и практическое значение настоящей работы.

Первая глава диссертации носит вводный характер. В ней излагаются основные положения теории, описывающих кинетические свойства

сверхтекучих растворов $^3\text{He}-^4\text{He}$, термоактивационное и подбарьерное гомогенное зародышеобразование, и проводится анализ имеющихся экспериментальных исследований акустических свойств растворов $^3\text{He}-^4\text{He}$ и кинетики фазового расслоения. В конце главы сформулированы выводы и постановка задачи данной диссертационной работы.

Во второй главе диссертации описана экспериментальная техника и результаты измерения скорости первого звука в примесонной системе сверхтекучих растворов $^3\text{He}-^4\text{He}$ при сверхнизких температурах.

В разделе 2.1 приведена схема рефрижератора растворения с внешним циклом циркуляции ^3He , который для проведения данной работы был дополнен секцией с тремя дискретными теплообменниками из спеченного медного порошка. При этом в холостом режиме температура достигала своего минимального значения 13мК, а холодопроизводительность при 100мК составляла 80мкВт и при 25мК - 4мкВт.

В разделе 2.2 подробно описывается техника акустических измерений. Измерительная ячейка со спеченным медным теплообменником, была соединена с камерой растворения посредством резьбового соединения. Для измерения температуры ячейки использовался кристаллизационный термометр, основанный на кривой плавления ^3He . Для определения скорости первого звука в сверхтекучих растворах $^3\text{He}-^4\text{He}$ при сверхнизких температурах была разработана оригинальная методика, основанная на известном способе наложения эхо-импульсов и обеспечивающая минимальное выделение тепла в процессе измерений при высокой точности измерений ($10^{-5}-10^{-6}$).

В разделе 2.3 описывается методика проведения акустических экспериментов в однородных сверхтекучих растворах с известной концентрацией. Для этого в измерительную ячейку конденсировали чистый ^4He , и затем в ячейку подавали порциями известное количество ^3He , и каждый раз после изотермической выдержки около часа регистрировали изменение скорости звука Δc по сравнению со скоростью звука в ^4He при $T = 0$: $\Delta c = c(0,0) - c(x,T)$, где $c(0,0) = 238,30$ м/с. Преимущество такого способа измерений состоит в том, что исключается необходимость дополнительной нормировки экспериментальных данных.

В разделе 2.4 приводятся результаты исследований концентрационной и температурной зависимости скорости звука. Полученные зависимости величины $\Delta c/c$ от концентрации ^3He приведены на рис. 1. а, б при двух фиксированных температурах. Результаты, относящиеся к температуре 165мК, нанесены вместе с данными работы Абрахама и др (Δ). При этой температуре концентрационная зависимость скорости звука, как известно, заметно отличается от линейной, что связано с тепловыми эффектами, зависящими от концентрации

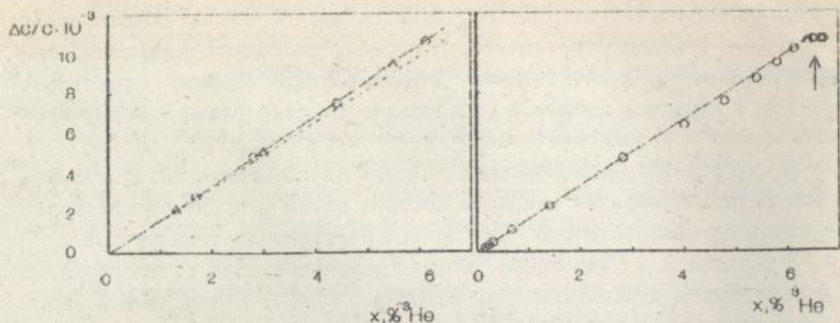


Рис.1 Зависимость относительного изменения скорости первого звука от концентрации раствора, при $T=165\text{мК}$ (а) и 28мК (б).

раствора. Однако при понижении температуры, как показали наши измерения, роль тепловых эффектов уменьшается, и можно считать, что ниже 50мК зависимость $\Delta c/c$ от x становится практически линейной. Это видно из рис.1.б, где приведен результат эксперимента, относящийся к температуре 28мК .

Сопоставим полученные экспериментальные данные с имеющимися теоретическими представлениями. Согласно кинетическим теориям Бейма-Саама и Адаменко-Цыганка, при расчете скорости первого звука удобно выделить две группы слагаемых- первую, не зависящую от температуры и зависящую от концентрации, и вторую, которая содержит зависимость $\Delta c/c$ как от концентрации, так и от температуры. Рассчитанные зависимости $\Delta c(x, T)/c$ от концентрации и температуры приведены на рисунке сплошной линией. Из рис.1.а,б видно, что полученные результаты эксперимента согласуются с предсказанием теории. Заметим, что экспериментальные данные получены без какой-либо дополнительной нормировки, а расчетные значения- без подгоночных параметров. Анализ показывает, что основной вклад в изменение скорости первого звука вносит независящее от температуры линейное уменьшение скорости с концентрацией. Таким образом, можно считать, что в условиях данного эксперимента звук распространяется в примесной подсистеме растворов, а влияние фононов пренебрежимо мало.

Следует заметить, что такая простая линейная зависимость скорости первого звука от концентрации может быть использована как один из методов регистрации изменений концентрации в процессе фазового расслоения, что и было сделано в дальнейшем.

Во третьей главе диссертации описана экспериментальная техника, используемая для исследования кинетики фазового расслоения

растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$.

В разделе 3.1 описывается оригинальный метод непрерывного изменения концентрации раствора непосредственно в ходе эксперимента, что необходимо для того, чтобы инициировать фазовое расслоение. В основе метода лежит использование специфических для сверхтекучих растворов явлений - термоосмоса и эффекта фонтанирования. Если сверхтекучий раствор ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ с исходной концентрацией x_0 заполняет две камеры - измерительную и управляющую с объемами соответственно V_1 и V_2 , и камеры соединены между собой капилляром, то в стационарном состоянии должно выполняться условие постоянства химического потенциала ${}^4\text{He}$, что приводит к равенству суммы давлений осмотического (Π) и фонтанирования (P_f) в каждой из камер:

$$\Pi(T_1, x) + P_f(T_1) = \Pi(T_2, x) + P_f(T_2) \quad (1)$$

где T_1, x_1 и T_2, x_2 - давление и концентрация в первой и второй камерах. Так как Π и P_f зависят от температуры, то, например, с повышением температуры в одной из камер концентрация ${}^3\text{He}$ в ней уменьшается, и происходит перетекание ${}^3\text{He}$ во вторую камеру. Чтобы однозначно определить концентрации x_1 и x_2 , условие (1) необходимо дополнить уравнением, выражающим закон сохранения количества ${}^3\text{He}$ во всей системе:

$$x_0 \cdot (V_1 + V_2) = x_1 \cdot V_1 + x_2 \cdot V_2 \quad (2)$$

Таким образом, если известна исходная концентрация, объемы и температуры обеих камер, то в любой момент времени можно определить концентрации в каждой камере.

Обсуждаемый метод реализуется с помощью двухкамерной ячейки, конструкция которой описана в разделе 3.2. Измерительная камера находилась в постоянном тепловом контакте с камерой растворения, а управляющая камера имела тепловой контакт с камерой испарения через тепловой ключ со сверхтекучим ${}^4\text{He}$ (раздел 3.3), который обеспечивал за счет своей высокой конвективной теплопередачи практически безынерционную тепловую связь между источником холода и исследуемым объектом. Размыкание ключа осуществляется за счет специфического явления для HeII - термомеханического эффекта.

Апробация данной методики была проведена с помощью специальных акустических измерений и описана в разделе 3.4. Изменение концентрации в измерительной камере регистрировалось с помощью измерений скорости звука. Полученные результаты сравнивались с термодинамическим расчетом, проведенным по формулам (1,2). В результате было получено согласие экспериментальных данных с расчетными в пределах погрешности.

В разделе 3.5 описываются методы получения и регистрации фазового расслоения. Для этого исходным было состояние исследуемого раствора, при котором температура и концентрация раствора в измерительной камере соответствовали точке на фазовой диаграмме, лежащей левее равновесной линии расслоения. При этом температура управляющей камеры составляла $\sim 0,8$ К, а температура измерительной камеры могла быть стабилизирована в интервале температур от 30 до 300 мК. После этого тепловой ключ размыкался, что приводило к тепловой изоляции управляющей камеры. Дальнейшее увеличение концентрации ^3He x_1 в измерительной камере осуществлялось путем медленного нагрева управляющей камеры со скоростями $4 + 6$ мК/мин. При такой скорости температура измерительной камеры оставалась постоянной в пределах $1,0 \pm 0,5$ мК. Величина x_1 измерялась двумя способами - акустическим и емкостным.

Звуковая ячейка и конденсаторный датчик помещались в измерительной камере таким образом, чтобы после расслоения исходного однородного раствора они располагались в нижней фазе расслоившегося раствора. Измерения проводились при давлениях в ячейке около 400 Торр, которое регистрировалось с помощью ртутного манометра. Таким образом, в эксперименте регистрировалась зависимость от времени относительной скорости звука $\Delta c/c$ и емкости C по мере нагрева управляющей камеры, т.е. по мере увеличения концентрации ^3He в измерительной камере.

В четвертой главе работы описаны исследования кинетики фазового расслоения сверхтекучих растворов ^3He - ^4He при сверхнизких температурах и делается попытка сопоставить полученные результаты с имеющимися теоретическими рассуждениями.

В разделе 4.1 приведен типичный временной ход зависимостей скорости звука и диэлектрической постоянной раствора от времени (рис. 2. а, б). С ростом концентрации наблюдалось монотонное изменение как скорости звука, так и емкости, причем эта монотонность не изменялась при переходе через линию фазового расслоения. Состояния, соответствующие моменту перехода через равновесную линию расслоения, отмечены на рис. 2. а, б стрелками. Аномальное поведение $\Delta c/c$ и C наблюдалось позднее, после весьма заметного пересыщения Δx раствора. При этом имели место скачки значений $\Delta c/c$ и C до величин, соответствующих их равновесным значениям (пунктирные линии на рис. 2. а, б). Это означает, что переход к новой фазе при фазовом расслоении раствора происходит через метастабильное состояние, как и при других фазовых переходах первого рода. Эксперименты показали, что наблюдаемая метастабильная фаза сверхтекучих растворов

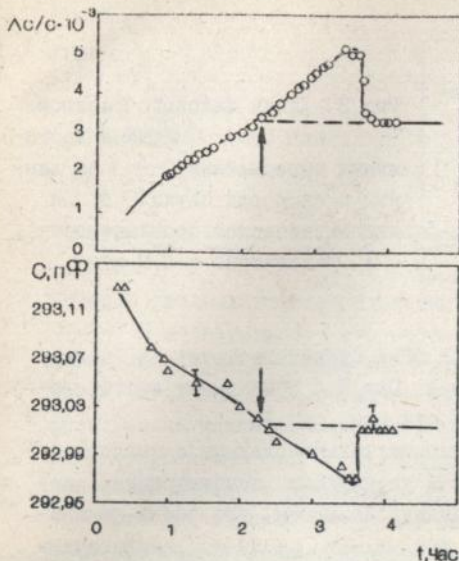


Рис. 2 Зависимость от времени относительной скорости первого звука и емкости конденсаторного датчика (давление 300 Торр; $T_1 = 75\text{мК}$; $x_0 = 0,88\%$; стрелка указывает момент времени, когда должно было наступить расслоение в соответствии с равновесной фазовой диаграммой).

$^3\text{He} - ^4\text{He}$ является долгоживущей. Система, находящаяся в метастабильном состоянии, как видно из рис. 2, быстро переходит в устойчивое состояние путем расслоения только тогда, когда концентрация x_1 будет иметь некоторое значение, соответствующее достижимому пересыщению. При этом результаты, полученные из акустических измерений, согласуются с емкостными данными. Поскольку в условиях данного эксперимента отсутствовала свободная граница жидкость-пар, то тем самым исключались условия, когда концентрированная фаза может возникать и развиваться из поверхностного слоя, богатого ^3He . Поэтому расслоение пересыщенного раствора должно осуществляться за счет образования зародышей новой фазы в объеме метастабильного раствора. Аналогичные измерения были проведены при других температурах, и в итоге построена область существования метастабильной фазы сверхтекучих растворов $^3\text{He} - ^4\text{He}$ между равновесной линией расслоения (бинодалью) и линией достижимых пересыщений (рис. 3). Линия, соответствующая равновесной линии фазового расслоения при данном давлении, показана сплошной линией, а экспериментальные точки, получены на основании акустических и емкостных измерений, определяют линию достижимого пересыщения. Результаты согласуются между собой в пределах суммарных экспериментальных ошибок.

Полученную в эксперименте температурную зависимость пересыщения раствора можно сопоставить с предсказанием теории Лифшица-Полесского - Хохлова. Пунктирная линия соответствует зависимости $\Delta x \sim T^{-1/2}$, характерной для термоактивационного зародышеобразова-

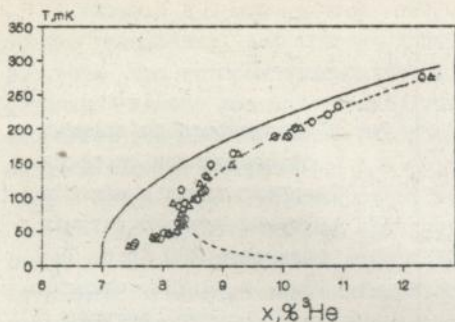


Рис.3 Линия фазового расслоения (—) и линия достижимых пересыщений (---) по данным о скорости звука (Δ) и диэлектрической проницаемости (o) (давление $\approx 0,5$ атм).

ния. Качественное согласие при $T > 50\text{мК}$ свидетельствует в пользу этого механизма зародышеобразования. При $T < 50\text{мК}$ имеет место заметное отклонение от этой зависимости (см. рис.3).

В разделе 4.2 приводятся экспериментальные данные о зависимости величины пересыщения от скорости увеличения концентрации раствора. Такие исследования были инициированы тем, что после появления экспериментов, описанных в предыдущем разделе, аналогичные измерения, но другими методами, были проведены еще в двух группах, и полученные результаты плохо согласуются между собой. Одной из возможных причин такого различия может быть влияние условий проведения эксперимента на кинетику фазового расслоения (во всех экспериментах были разные скорости изменения метастабильности и различные экспериментальные объемы). Влияние скорости изменения концентрации (\dot{x}) на величину пересыщения (Δx) и проверялось экспериментально. Измерения показали, что пересыщение растет с увеличением скорости изменения концентрации по слабому степенному закону, близкому к $1/3$. Если учесть разные экспериментальные условия и привести к одному и тому же значению \dot{x} и объему, то получается гораздо лучшее согласие и более четко виден термоактивационный характер температурной зависимости пересыщения при $T > 50\text{мК}$. Ниже 50мК Δx почти не зависит от температуры, что может свидетельствовать о проявлении квантовых эффектов при зародышеобразовании.

В разделе 4.3 описаны исследования кинетики зародышеобразования и роста новой фазы в процессе расслоения. Одновременные измерения изменений скорости первого звука и диэлектрической постоянной от времени в процессе фазового расслоения (рис.4) позволяют получить такие сведения. Из графиков следует интересный результат - метод диэлектрической проницаемости и акустический метод показывают разную кинетику изменения концентрации разбавленной фазы в первые минуты после расслоения. Однако этот график был получен в предположении, что весь избыточный ^3Ne находится в растворе в виде

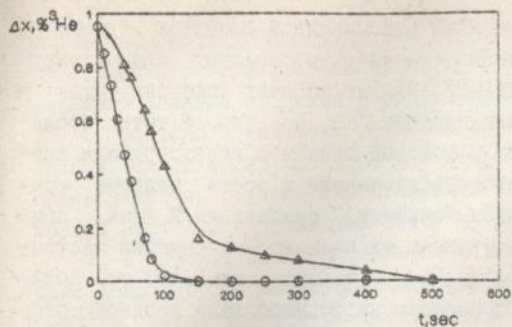


Рис. 4 Кинетика изменения пересыщения нижней расслоившейся фазы раствора сразу после начала фазового перехода, полученная из измерений скорости звука (Δ) и диэлектрической проницаемости (o), $T = 111\text{K}$, $P = 485$ Торр.

атомов. Неадекватность полученных при этом результатов свидетельствует в пользу того, что часть избыточного ^3He , соответствующая концентрации Δx_d , должна находиться в виде зародышей-капель новой фазы. Тогда необходимо учесть влияние зародышей - капель новой фазы как на изменение скорости первого звука, так и на диэлектрическую проницаемость. Такая проблема была недавно рассмотрена теоретически в работе Адаменко и др., где была решена задача о распространении плоской монохроматической волны первого звука в пересыщенном сверхтекучем растворе ^3He в HeII и рассмотрены диэлектрические свойства такой системы. Если решить полученные ими уравнения, описывающие изменения скорости звука и диэлектрической прони-

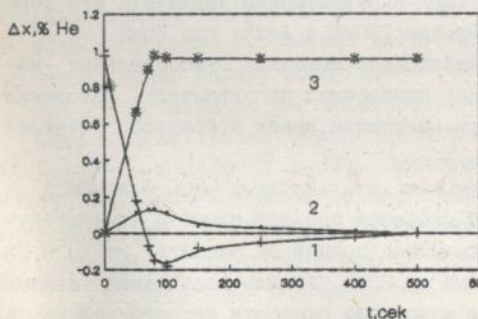


Рис. 5 Изменение во времени вкладов в пересыщение раствора, вносимых атомами (1) и зародышами - каплями новой фазы (2), а также кинетика удаления избыточного ^3He из нижней фазы (3), $T = 111\text{K}$, $P = 485$ Торр.

цаемости с учетом полученных в данной работе экспериментальных данных, то можно ответить на вопрос, как образуется новая фаза (рис. 5). В первый момент после начала фазового перехода ($t = 0$) все пересыщение Δx_d присутствует в виде атомов (кривая 1) - $\Delta x = \Delta x_d$, а капли новой концентрированной фазы еще не образовались (кривая 2) - $\Delta x_d = 0$. Формирование зародышей в виде капелек активно происходит в первые 50 секунд (рост Δx_d), что, естественно, сопровождается резким уменьшением Δx . Одновременно с этим на-

чинается процесс "очистки" нижней разбавленной фазы от "лишнего" ${}^3\text{He}$ (кривая 3), который поднимается вверх и образует концентрированную фазу. Этот процесс происходит как за счет диффузии, так и за счет всплытия более легких капелек ${}^3\text{He}$. На рис. 5 четко проявляется максимум на кривой Δx_d , который связан с конкурирующим влиянием двух процессов - процесса образования и роста капелек концентрированной фазы и процесса "очистки" разбавленной фазы. Кривая 3 на рис. 5 получена вычитанием из полного пересыщения раствора Δx_{II} суммы вкладов $\Delta x(t) + \Delta x_d(t)$, т.е. она показывает то количество избыточного ${}^3\text{He}$, которое идет на формирование верхней расслоившейся фазы. Приведенные данные показывают, что через ≈ 100 сек формирование новой фазы, в основном, завершается. Полученное значение характерного времени формирования верхней расслоившейся фазы согласуется с недавними ЯМР экспериментами, где регистрация фазового расслоения в сверхтекучих растворах проводилась методом ЯМР, причем датчик регистрировал процессы, происходящие именно в верхней концентрированной фазе.

В заключении диссертации сформулированы следующие основные результаты работы:

1. Разработан и создан низкотемпературный блок с дискретными теплообменниками, позволивший понизить минимальную температуру рефрижератора растворения до 12мК и существенно увеличить его холодопроизводительность до 80мкВт при 100мК и 4мкВт при 25мК.

2. Создана и налажена прецизионная методика относительных измерений скорости первого звука, основанная на принципе наложения эхо-импульсов, при минимальном выделении тепла в процессе измерений.

3. Проведены экспериментальные исследования температурной и концентрационной зависимостей скорости первого звука в сверхтекучем растворе ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ в области концентраций от чистого ${}^4\text{He}$ до 6,5% ${}^3\text{He}$ и при температурах от 180мК до 25мК. Анализ полученных данных показал, что основной вклад в изменение скорости первого звука в примесной системе растворов вносит независимое от температуры линейное уменьшение скорости с концентрацией, а вкладом тепловых возбуждений можно пренебречь.

4. Создана и налажена оригинальная методика непрерывного изменения концентрации исследуемого раствора непосредственно в ходе эксперимента, основанная на изменении осмотического давления и давления фонтанирования.

5. Разработан и создан тепловой ключ, рабочим веществом которого является сверхтекучий ${}^4\text{He}$, позволяющий быстро охладить боль-

шие объемы исследуемой жидкости до температуры $\approx 0,7\text{K}$ и дающий возможность отогреть рабочую камеру до температуры $\approx 1,5\text{K}$ без видимого влияния на режим работы рефрижератора растворения.

6. Создана и налажена методика независимых измерений концентрации исследуемого раствора с помощью измерений диэлектрической проницаемости, позволившая проводить измерения изменений концентрации раствора с точностью $\pm 10^{-2}\%$ ^3He .

7. В широкой области температур и концентраций зарегистрировано долгоживущее метастабильное сверхтекучее состояние растворов $^3\text{He}-^4\text{He}$, через которое осуществляется фазовый переход к расслоившимся фазам. На фазовой диаграмме растворов $^3\text{He}-^4\text{He}$ определена область существования метастабильного состояния между равновесной линией расслоения и линией достижимых пересыщений.

8. Измерены значения достижимых пересыщений Δx сверхтекучих растворов $^3\text{He}-^4\text{He}$ при различных температурах и концентрациях. Установлено, что в области температур $50 - 250\text{mK}$ имеет место зависимость $\Delta x^2 \cdot T = \text{const}$, характерная для термоактивационного механизма зародышеобразования. Отклонение от этой зависимости, обнаруженное ниже 50mK , может быть связано с проявлением квантовых эффектов.

9. С помощью одновременных измерений скорости первого звука и диэлектрической проницаемости изучена кинетика образования новой фазы в процессе расслоения растворов $^3\text{He}-^4\text{He}$. Было установлено, что в первый момент после начала фазового перехода весь избыточный ^3He в пересыщенном растворе присутствует в виде растворенных атомов, а формирование капель - зародышей новой фазы активно происходит в течение $20-50$ секунд. Одновременно с этим начинается всплытие зародышей - капель за счет гравитации и образование концентрированной фазы в измерительной ячейке. Формирование новой фазы, в основном, завершается через 100 секунд.

10. Проведено экспериментальное исследование величины пересыщения метастабильного раствора. Обнаружено, что Δx растет с ростом скорости изменения концентрации по слабому степенному закону. Для выяснения причин такого поведения требуются дополнительные экспериментальные и теоретические исследования.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Рудавский Э. Я., Чаговец В. К., Шешин Г. А. // ФНТ. - т. 15, N7. - 1989. - с. 568-573.
2. Рудавский Э. Я., Чаговец В. К., Шешин Г. А. // 11 Всесоюзная акустическая конференция. Москва. - 1991. - с. 39-42.
3. Михеев В. А., Мовсесян Г. Д., Бабаян К. З., Мина Р. Т., Майданов В. А., Михин Н. П., Чаговец В. К., Шешин Г. А. // ПТЭ. - 1989. - N1. - с. 226-227.

4. Рудавский Э.Я., Чаговец (СССР), - опубл. Б.И. N11.
5. Рудавский Э.Я., Чаговец В.К. семинар по физике и технике докладов). Донецк. - 1989.
6. Рудавский Э.Я., Чаговец В.К.; Шешин Г.А. // XX Научно-техническая конференция молодых исследователей (тезисы докладов) Харьков. - 1989. - с.170-171.
7. Михеев В.А., Рудавский Э.Я., Чаговец В.К., Шешин Г.А. // IV Республиканский семинар по физике и технике сверхнизких температур (тезисы докладов). Донецк. - 1989. - с.44-45.
8. Михеев В.А., Рудавский Э.Я., Чаговец В.К., Шешин Г.А. // XX Научно-техническая конференция молодых исследователей (тезисы докладов) Харьков. - 1989. - с.168-169.
9. Михеев В.А., Рудавский Э.Я., Чаговец В.К., Шешин Г.А. // ФНТ. - т.15, N7. - 1989. - с.767-770.
10. Рудавский Э.Я., Чаговец В.К., Шешин Г.А. // ПТЭ. - 1991. - N4. - с.226-227.
11. Михеев В.А., Рудавский Э.Я., Чаговец В.К., Шешин Г.А. // XXVI Всесоюзное совещание по физике низких температур. Донецк. - 1990. - т.2, с.72-73.
12. Mikheev V.A., Rudavskii E.Y., Chagovets V.K., Sheshin G.A. // Physica B, - 1991. - p.511-512.
13. Шешин Г.А. // XXI Научно-техническая конференция молодых исследователей (тезисы докладов). Харьков. - 1990. - с.29-30.
14. Шешин Г.А. // XXII Научно-техническая конференция молодых исследователей (тезисы докладов). Харьков. - 1991. - с.19-20.
15. Михеев В.А., Рудавский Э.Я., Чаговец В.К., Шешин Г.А. // ФНТ. - т.17, N4. - 1991. - 445-450.
16. Михеев В.А., Рудавский Э.Я., Чаговец В.К., Шешин Г.А. // XXIX Совещание по физике низких температур. Казань. - 1992. - с.74.
17. Михеев В.А., Рудавский Э.Я., Чаговец В.К., Шешин Г.А. // ФНТ. - т.18, N10. - 1992. - с.1091-1095.
18. Mikheev V.A., Rudavskii E.Y., Chagovets V.K.; Sheshin G.A. // EST Network on quantum fluids and solid first workshop: superfluidity. Cargese. - 1993. - p.228-231.
19. Майданов В.А., Михеев В.А., Михин Н.П., Омелаенко Н.Ф., Рудавский Э.Я., Чаговец В.К., Шешин Г.А. // ФНТ. - т.18, N9. - 1992. - с.943-951.
20. Chagovets V.K., Maidanov V.A., Mikhin N.P., Omelaenko N.F., Mikheev V.A., Rudavskii E.Y., Sheshin G.A. // International conference Physics in Ukraine Kiev. - 1993. - p.59-62.

ШЕШИН Григорий Александрович

Ответственный за выпуск - кандидат физ.-мат. наук
Сколов С.С.

Подписано к печати 17 декабря 1993 Усл. печ. л. 1
Учетн. изд. л. 1 Заказ N 85 Тираж 100 экз. Бесплатно