

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР
ім. Б. І. Веркіна**

ШЕШИН Григорій Олександрович



УДК 538.941

**КІНЕТИЧНІ ТА ДИНАМІЧНІ ЕФЕКТИ У НАДПЛИННОМУ ГЕЛІ ТА
ЙОГО ІЗОТОПІЧНИХ РОЗЧИНАХ В УМОВАХ НЕОДНОРІДНОСТІ
ТЕМПЕРАТУРИ ТА ТИСКУ**

01.04.09 – фізика низьких температур

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, м. Харків.

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор
Тарапов Сергій Іванович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України,
завідувач відділу радіоспектроскопії;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Полуектов Юрій Матвійович,
Національний науковий центр
«Харківський фізико-технічний інститут»
НАН України,
начальник лабораторії дифузійних
та електронних явищ у твердих тілах;

доктор фізико-математичних наук, професор
Вовк Руслан Володимирович,
Харківський національний університет
ім. В. Н. Каразіна,
декан фізичного факультету.

Захист відбудеться «6» червня 2017 року о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.175.02 при Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

Автореферат розісланий «27» квітня 2017 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.175.02,
доктор фізико-математичних наук

 Богдан М. М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В останні роки при дослідженні конвекції, турбулентності та інших нелінійних явищ в рідинах все більшу увагу привертають до себе рідкий ^4He , ^3He та їх розчини ^3He в ^4He . Властивості цих рідин дозволяють, змінюючи температуру і концентрацію домішки ^3He в розчині, проводити дослідження як в звичайних, нормальних, так і в надплинних рідинах в діапазоні температур від 2,17 К (T_λ) до 10 мК.

При цьому кінетичні коефіцієнти, такі як теплопровідність, термодифузія, дифузія, в'язкість та інші можуть змінювати свою величину на чотири та навіть шість порядків. Тому у рідких фазах гелію досить просто створювати нерівноважні і неоднорідні умови, які можуть призвести до появи замкнених течій при конвекції та турбулентності та до фазових переходів, таких як розшарування ізотопічного розчину ^3He - ^4He . Таке розшарування починається з утворення зародків фази ^3He і формування міжфазної границі. При цьому виявляється, що за допомогою акустичної хвилі стає можливим керування рухом фазової межі і вимірювання її рухливості.

Оскільки надплинні Бозе- і Фермі-рідини підпорядковуються квантовим закономірностям, то стає можливим спостерігати і вивчати зародкоутворення і формування вихрів у надплинному режимі течії. Більш того, якщо в нормальній рідині ($T > T_\lambda$) при збудженні гідродинамічної течії створюється класична турбулентність, то для випадку, коли $T < T_\lambda$, можна спостерігати квазикласичну турбулентність, обумовлену виникненням джгута майже паралельних квантових вихрів, який імітує класичний вихор. При температурі нижче за 0,5 К, коли густина теплових збуджень надплинної рідини стає незначною, виникає квантова турбулентність, яка спричинена взаємодією між квантовими вихрами, що утворюють за таких умов турбулентний клубок.

Перші експериментальні дослідження вихроутворення і розвитку турбулентності в надплинному гелії при наявності сильної неоднорідності і при сильному відхиленні від рівноваги були проведені ще в середині минулого століття. Однак тільки в останні два десятиліття завдяки інтенсивному розвитку кріогенної техніки, створенню відповідної апаратури і розробці нових методик відновився значний інтерес до експериментального і теоретичного дослідження цієї проблеми у провідних низькотемпературних лабораторій світу.

Недавно було показано, що кінетичні процеси при ламінарній течії квантової рідини та процеси збудження турбулентності в гелії можна ефективно досліджувати, зануливши в неї осцилююче тіло і створюючи тим самим відносно обтікання поверхні тіла рідиною. Це відкриває нові можливості для вивчення не тільки дисипативних процесів у надплинному гелії, але й цілого комплексу явищ, пов'язаних з двокомпонентною природою надплинності як у режимі гідродинамічної течії, так і кінетичному режимі, якому притаманні різноманітні релаксаційні процеси, обумовлені взаємодією елементарних збуджень різного типу.

До сильно неоднорідних систем можна віднести також двовимірні атомні плівки гелію на поверхні твердого тіла. Відомо, що величина температури

переходу в надплинний стан залежить як від товщини плівки гелію, так і від величини сил Ван-дер-Ваальса матеріалу під плівкою. Таким чином, нанесенням на поверхню матеріалу додаткового шару сторонніх атомів можна змінити силу Ван-дер-Ваальса, що діє на плівку гелію з боку підкладки. Це змінює умови виникнення надплинності в ^4He , які раніше в таких системах не досліджувались.

Наявність перерахованих невирішених питань зумовлює важливість проведення систематичних експериментальних досліджень конвекційної та турбулентної течії у надплинному гелії та його ізотопічних розчинах, рухливості і стійкості міжфазної межі, гетерогенного зародкоутворення на квантованих вихрах та двовимірної надплинності. Цим визначається тема даної дисертаційної роботи і її безсумнівна **актуальність**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, які склали дисертаційну роботу, виконано у відділі квантових рідин та кристалів Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України в межах тематичного плану інституту відповідно до відомих тем:

- тема «Кінетичні та релаксаційні процеси в квантових рідинах і кристалах при наднизьких температурах», номер державної реєстрації 0196U002949; термін виконання 1995 – 1999 рр.;
- тема «Дослідження нових квантових систем в рідкому і твердому гелії при наднизьких температурах», номер державної реєстрації 0100U004483; термін виконання 2000 – 2002 рр.;
- тема «Неоднорідні і низькорозмірні системи в рідкому і твердому гелії», номер державної реєстрації 0103U000331, термін виконання 2003–2005 рр.;
- тема «Нові ефекти в квантових рідинах та кристалах при низьких та наднизьких температурах» номер державної реєстрації 0106U002557, термін виконання 2006 – 2010 рр.;
- тема «Об'ємні і поверхневі наносистеми в квантових рідинах і кристалах», номер державної реєстрації 0110U007894, термін виконання 2011 – 2015 рр.;
- робота також частково проводилася в межах проектів Українського науково-технологічного центру (УНТЦ) «Пошук та моделювання нових наносистем у конденсованому гелії», номер державної реєстрації 0110U004800, термін виконання 2010 – 2012 рр..

Мета і завдання дослідження. Метою є виявлення закономірностей кінетичних та динамічних процесів в рідкому гелії та його ізотопічних розчинах під впливом градієнтів температури і тиску та зміни концентрації ізотопу.

Для досягнення мети ставилися і вирішувалися наступні **задачі**:

- визначити основні механізми дисипації кінетичної енергії осцилюючого тіла, зануреного у надплинний гелій;
- дослідити конвекційну течію в розчинах ^3He в ^4He з різною концентрацією домішки ^3He і визначити вплив такої течії на стійкість фазової межі розшарованого розчину;

- визначити рухливості міжфазної межі розчину ^3He - ^4He та механізми дисипативних втрат акустичної хвилі на межі фазового розшарування розчину;
- вивчити гетерогенне зародкоутворення в розчинах ^3He - ^4He в присутності конвекційної течії та ідентифікувати можливі механізми гетерогенного зародкоутворення;
- дослідити особливості збудження турбулентної течії в надплинності і з'ясувати ролі нормальної компоненти при створенні та розвитку турбулентної течії;
- дослідити вплив випромінювання акустичної хвилі, збудженої джерелом монохроматичного випромінювання, зануреним в надплинний гелій, на дисипативні процеси та величину критичної швидкості переходу від ламінарної до турбулентної течії;
- вивчити турбулентну течію в розчинах ^3He в ^4He та умови конденсації ^3He на квантованих вихрах;
- дослідити надплинності в двовимірних плівках ^4He , адсорбованого на графойлі, і з'ясувати вплив сил Ван-дер-Ваальса з боку підкладки на температуру надплинного переходу.

Об'єктом дослідження є кінетичні та динамічні процеси при нерівноважних умовах в квантових рідинах при наднизьких температурах.

Предметом дослідження дисертаційної роботи є дисипативні процеси в надплинних рідинах при конвекційних та турбулентних течіях при формуванні межі фаз в розшарованих розчинах ^3He - ^4He , яка супроводжується гетерогенним зародкоутворенням в надплинних розчинах, а також перехід до надплинного стану у двовимірних плівках гелію.

Методи дослідження. Основним експериментальним методом досліджень є прецизійне вимірювання тиску, концентрації надплинної рідини і тиску пари над атомарними плівками ^4He безпосередньо у вимірювальній комірці за допомогою ємнісних датчиків, а також високочастотний акустичний імпульсний метод вимірювання швидкості і поглинання першого звуку, високочутливі вимірювання амплітуди коливань, частоти і ширини резонансу осцилюючого кварцового резонатора, зануреного в He II , одночасні прецизійні вимірювання градієнтів температур і концентрацій для визначення коефіцієнтів термодифузії і теплопровідності надплинної рідини при наявності теплового потоку, вирощування атомарних плівок ^4He і дейтероводню (HD) на графойлі за допомогою методики вимірювання ізотерм адсорбції, вимірювання температури переходу в надплинний стан атомарних плівок ^4He за допомогою торсійного осцилятора.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше експериментально виявлено, що при термодифузії у надплинному розчині ^3He у ^4He співвідношення між стаціонарними градієнтами температури та концентрації домішок визначається парціальним тиском квазичастинок ^3He ,

в той час як внеском фононів та ротонів при наднизьких температурах можливо знехтувати.

2. Вперше встановлено, що розшарування надплинного розчину ^3He - ^4He при наявності теплового потоку починається з гетерогенного зародкоутворення на квантованих вихрах, при цьому межа між цими фазами стає нестійкою зі зростанням потужності потоку, а в об'ємі розчину збуджується конвекційна турбулентність.

3. Вперше виявлено, що зі зменшенням температури коефіцієнт проходження акустичної хвилі через межу розшарування розчину ^3He - ^4He суттєво зменшується, а коефіцієнт відбиття стає близьким до одиниці. Встановлено, що розрахована за допомогою одержаних коефіцієнтів проходження та відбиття температурна залежність коефіцієнта рухливості фазової межі є функцією, обернено пропорційною квадрату температури.

4. Вперше встановлено, що у розчині ^3He у ^4He збільшення густини нормальної компоненти веде до зростання критичної швидкості переходу до турбулентної течії. Показано, що при надплинній течії цього розчину домішки ^3He конденсуються в корі квантованого вихра за умов, що швидкість плинину перевищує відповідну критичну швидкість чистого надплинного гелію.

5. Вперше виявлено, що перехід від ламінарної до турбулентної течії в надплинному гелії при наднизьких температурах відбувається через проміжний режим течії, який характеризується зростанням густини квантових вихрів та розсіюванням на них теплових збуджень. При $T > 0,7$ К перехід до турбулентної течії відбувається так само, як в звичайних рідинах або газах, і супроводжується зміною лінійної залежності сили тертя від швидкості на квадратичну.

6. Вперше визначено температурну залежність дисипації енергії коливань камертона, зануреного у надплинний гелій, та запропоновано емпіричну залежність, яка описує температурну поведінку коефіцієнта питомого опору камертона як у гідродинамічному, так і балістичному режимах розсіювання теплових збуджень.

7. Вперше визначено вплив сил Ван-дер-Ваальса на температуру надплинного переходу в моноатомних плівках ^4He на графойлі з проміжними шарами дейтероводню. Встановлено, що збільшення кількості проміжних моноатомних шарів дейтероводню призводить до збільшення температури, при якій спостерігається перехід у надплинний стан у моноатомних плівках ^4He .

8. Вперше виявлено, що конденсація рідкого шару гелію на моношарах твердого гелію, який міститься на поверхні двох атомарних шарів дейтероводню, супроводжується формуванням двовимірних крапель рідкого гелію. У той же час на трьох атомарних шарах дейтероводню гелій рівномірно розподіляється в процесі заповнення атомарних шарів.

Наукове та практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що вони суттєво розширюють уявлення про властивості надплинних ^4He та розчинів ^3He - ^4He як в однорідних, так і неоднорідних умовах і дозволяють використовувати ці системи як модельні для досліджень різних течій газів та

рідин. Виявлений в даній роботі надплинний перехід в двовимірних плівках гелію та конденсація і зростання його атомних шарів мають фундаментальне значення у фізиці низькорозмірних систем. Розуміння природи знайдених в роботі ефектів, які пов'язані з фундаментальними характеристиками надплинного гелію, дозволяє прогнозувати фізичні властивості його конвекційних і турбулентних течій та процеси розшарування його ізотопічних розчинів при низьких температурах. Результати дисертації можуть стимулювати подальший розвиток актуальних напрямків фізики конденсованого стану при низьких та наднизьких температурах: фізики нелінійних явищ у гідродинаміці надплинної рідини, процесів гетерогенного зародкоутворення нової фази у розчинах, фізики двовимірних наносистем та надплинних плівок. Отримані дані про коефіцієнт рухливості міжфазної межі в надплинних розчинах ^3He - ^4He розширюють уявлення про процеси зародкоутворення нової фази в фізичних системах різної природи. Результати щодо термодифузії в надплинних розчинах мають наукове і практичне значення для розуміння кінетичних процесів при конструюванні рефрижераторів розчинення. Особливе значення при розробці таких рефрижераторів мають отримані у роботі дані про збудження конвекційної течії за умов появи межі між фазами розшарованого розчину. Запропонована методика вивчення гетерогенного зародкоутворення нової фази на квантованих вихрах дозволяє використовувати аналогічний експериментальний та теоретичний підхід для дослідження гетерогенного зародкоутворення в різних системах, що містять неоднорідні розподіли у вигляді вихрів. Розроблена автором методика кварцового камертона дозволяє досліджувати різні дисипативні процеси малої потужності, менше ніж за 10^{-14} Вт, а запропоновані ним засоби усунення акустичного випромінювання мають практичне значення при конструюванні мініатюрних термометрів, ареометрів та датчиків вимірювання в'язкості.

Особистий внесок здобувача. Наукові статті, у яких представлені основні результати дисертаційної роботи, опубліковані в співавторстві. Дисертантові належать вибір та обґрунтування напрямків досліджень, постановка конкретних завдань, провідна роль у проведенні експериментальних досліджень, головний внесок у написанні статей, аналіз та інтерпретація результатів. Автором особисто виявлено ефекти розшарування фаз, викликані тепловим потоком, зародкоутворення нової фази та виникнення конвекційної турбулентної течії у надплинних розчинах ^3He - ^4He . Дисертантом вперше встановлено температурну залежність коефіцієнта рухливості фазової межі розшарованого розчину ^3He в ^4He . Автором особисто виявлено проміжний режим турбулентної течії гелію при температурах нижче 1К. Дисертантом особисто виявлено, що зменшення густини нормальної компоненти у надплинному гелії збільшує стійкість його ламінарної течії, і цей ефект суттєво зростає у розчинах ^3He в ^4He . Здобувачем експериментально показано, що осцилюючий камертон, занурений у надплинний гелій, є випромінювачем акустичної хвилі. Безпосередньо автором запропоновано спосіб визначення і опису різних дисипативних процесів, які викликані коливаннями тіла, зануреного в He II.

Автором встановлено вплив сил Ван-дер-Ваальса на перехід у надплинний стан атомарних шарів гелію на графойлі. Дисертантом суттєво модернізовано унікальне наукове устаткування для дослідження низькотемпературних кінетичних процесів у надплинній рідині та створено нові експериментальні методики, що може бути використано в дослідженнях неоднорідних надплинних рідин. Таким чином, особистий внесок автора в ці роботи є визначальним.

Апробація результатів дисертації. Отримані результати доповідались автором особисто на міжнародних профільних конференціях. Основні результати було апробовано на:

- 21th International Conference on Low Temperature Physics (August 8-14, 1996, Prague, Czech Republic);
- 2nd Workshop on «New Phenomena of Helium in the Low Dimensional Situation» (December 20-22, 1999, Atami, Japan);
- Conference Physical Society of Japan (May 1-5, 2000, Osaka, Japan);
- International Conference “Physics of liquid matter: Modern problems” (May 28-31, 2001, Kyiv, Ukraine);
- International Conference “Physics of liquid matter: Modern problems” (May 28-31, 2003, Kyiv, Ukraine);
- 33^e Всероссийское совещание по физике низких температур (17-20 июня, 2003, Екатеринбург, Российская Федерация);
- International Symposium on Quantum Fluids and Solids (August 3-8, 2003, Albuquerque, USA);
- International Conference “Physics of liquid matter: Modern problems” (May 28-31, 2005, Kyiv, Ukraine);
- 20th General Conference Condensed Matter Division EPS (August 7-13, 2004, Prague, Czech Republic);
- International Symposium on Quantum Fluids and Solids (August 1-6, 2006, Kyoto, Japan);
- International Conference in Ukraine “Condensed Matter: Theory and Applications” (25-28 May, 2007, Kiev, Ukraine);
- 35^e Совещание по физике низких температур (29 сентября – 2 октября, 2009, Черногловка, Российская Федерация);
- International Conference “Physics of liquid matter: Modern problems” (May 28-31, 2010, Kyiv, Ukraine);
- International Symposium on Quantum Fluids and Solids (August 1-7, 2010, Grenoble, France);
- International Conference on Low Temperature Physics (August 10-17, 2011, Beijing, China);
- International Symposium on Quantum Fluids and Solids (August 15-21, 2012, Lancaster, United Kingdom);
- 9th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals (September 2-8, 2012, Odessa, Ukraine);

- International Symposium on Quantum Fluids and Solids (August 1-6, 2013, Matsue, Japan);
- 11th International Conference “Physics of liquid matter: Modern problems” May 23-27, 2014 (Kyiv, Ukraine);
- 37th Meeting on Low Temperature Physics (June 29-July 3, 2015, Kazan, Russian Federation);
- 7th Int. Conf. «Physics of liquid matter: Modern problems» (May 28-29, 2016, Kyiv, Ukraine);
- International Symposium on Quantum Fluids and Solids (August 10-16, 2016, Prague, Czech Republic).

Публікації. Основні результати роботи викладено у 47 працях. З них – 25 статей, які опубліковані у провідних фахових наукових виданнях [1–25], а також 22 тез доповідей на профільних наукових конференціях [26–47].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, семи розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 292 сторінок. Вона містить 101 рисунок, 3 таблиці та список використаних джерел з 289 найменувань на 27 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

Вступ містить загальну характеристику роботи, в ньому сформульовано мету, основні завдання та прикладне значення проведених досліджень, перераховано об'єкти та методи таких досліджень. Крім того, обґрунтовано актуальність обраної тематики, наукову новизну и практичне значення роботи. Наведено дані про особистий внесок дисертанта, а також відомості щодо апробації роботи та наукові публікації. Обґрунтовано та описано загальну структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Кінетичні властивості надплинних рідин. Слабка неоднорідність» міститься огляд літератури, присвяченої експериментальним та теоретичним результатам щодо кінетичних коефіцієнтів, таких як коефіцієнт термодифузії, теплопровідність та в'язкість в He II і надплинних розчинах ^3He в ^4He з різними концентраціями від 5 % до 9,8 % ^3He в широкому інтервалі температур від 0,05 К до 2,5 К. Описано результати, що отримані в процесі проведення досліджень щодо коефіцієнта термодифузії, і проведено порівняння результатів експерименту з сучасними теоретичними уявленнями. Описано коефіцієнт в'язкого тертя, який не можна використовувати для опису дисипативних процесів в He II при температурі нижче за 0,7 К, коли спостерігається балістичне розсіювання теплових збуджень. Тому для опису дисипативних процесів за рахунок тертя або розсіювання теплових збуджень на осцилюючому камертоні було запропоновано користуватися коефіцієнтом питомого опору, що дозволило з використанням простих гідродинамічних і кінетичних виразів описати поведінку осцилюючих тіл різної геометрії, які занурені в рідкий гелій, на різних резонансних частотах у широкому інтервалі

температур. На рис. 1 надана температурна залежність коефіцієнта питомого опору для двох камертонів, занурених в He II, з резонансними частотами 32,0

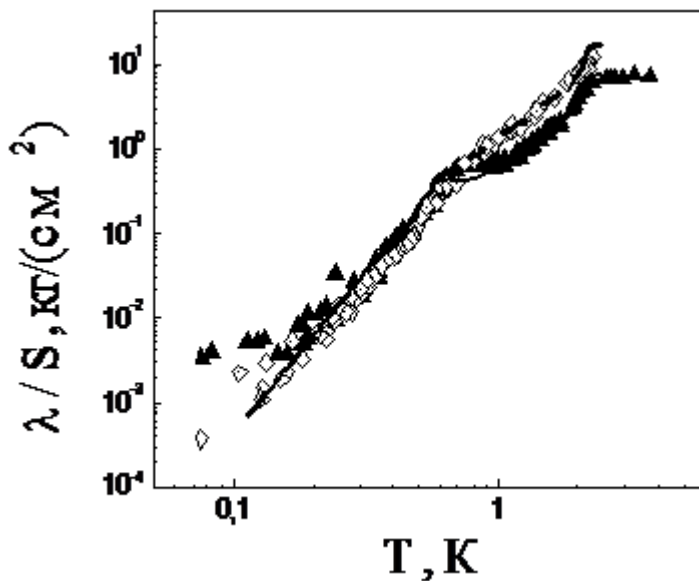


Рис. 1. Температурна залежність коефіцієнта питомого потоку.

поглинання першого звуку α в надплинному гелії обґрунтовано працездатність вибраних методів та приведено результати щодо вимірювань ними c_1 та α в надплинних розчинах ^3He - ^4He . Показано, що

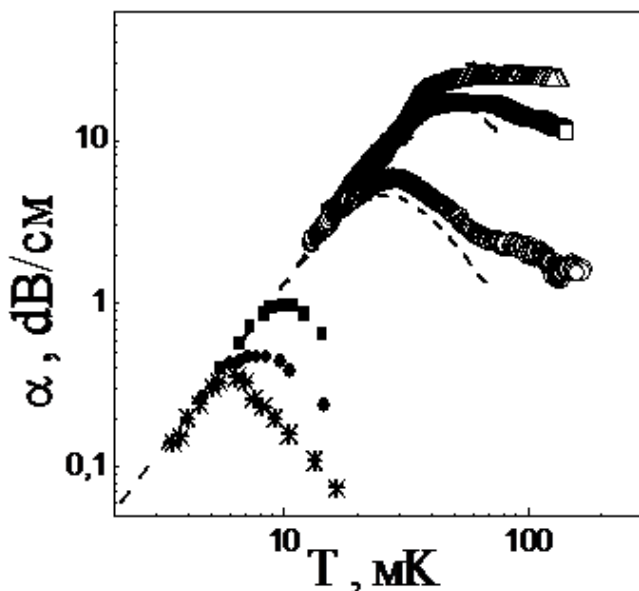


Рис. 2. Температурна залежність поглинання першого звуку.

для порівняння наведені дані роботи (Fujii I. et al. 1984) для частот * – 0,598 МГц, ■ – 1,017 МГц, ● – 1,89 МГц. На рис. 2 видне добре узгодження між

(▲) і 6,6 кГц (◇). Суцільною і пунктирною лініями показано розрахунок з використанням емпіричного виразу, запропонованого в роботі. Як видно з рисунка, є хороша згода між експериментальними даними та розрахунком.

Другий розділ «Дослідження акустичних властивостей надплинних рідин» присвячено розгляду експериментальних та теоретичних методів дослідження властивостей надплинних рідин при низьких та наднизьких температурах, що їх використано в роботі. На прикладі вимірювань швидкості c_1 та

кінетичні явища в надплинних розчинах при температурах нижчих ніж 0,2 К визначаються розсіюванням фононів та квазічастинок ^3He , а отримані експериментальні результати з температурної залежності поглинання першого звуку, наведені на рис. 2, описуються в межах сучасної теорії розповсюдження звуку в газі фермієвських збуджень. Теоретичний розрахунок показаний пунктирною лінією на рис. 2, де також наведені експериментальні дані, отримані для різних частот коливання акустичної хвилі : ○ – $f = 9,25$ МГц, □ – $f = 30$ МГц, Δ – $f = 52$ МГц. Крім того, на рис. 2

раніше отриманими даними, теоретичним розрахунком і даними, що одержані в даній роботі акустичним методом, який в подальшому використаний для дослідження рухливості міжфазної межі (Розділ четвертий).

Осцилюючий кварцовий камертон при певних умовах можна вважати джерелом монохроматичного акустичного випромінювання. Це явище супроводжується додатковою кінетичною дисипацією енергії ніжок камертона, що йде на збудження акустичної хвилі. В розділі описано результати вперше проведеної прямої реєстрації акустичного випромінювання осцилюючого тіла у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Показано, що поведінку осцилюючого камертона можна описати в межах моделі квадрупольного випромінювача акустичної хвилі, а ширину його резонансної лінії описати залежністю:

$$\Delta f = C_{3D} \frac{64\pi^4 0,3915^2 (H + D)^2 \rho_4}{5\rho_q c_1^5} f^6 m_q \left(\frac{f_0}{f} \right) \quad (1)$$

де H, D – ширина ніжки камертона і відстань між ними відповідно, ρ – густина рідини, ω – частота коливань камертона, v – амплітуда швидкості коливань

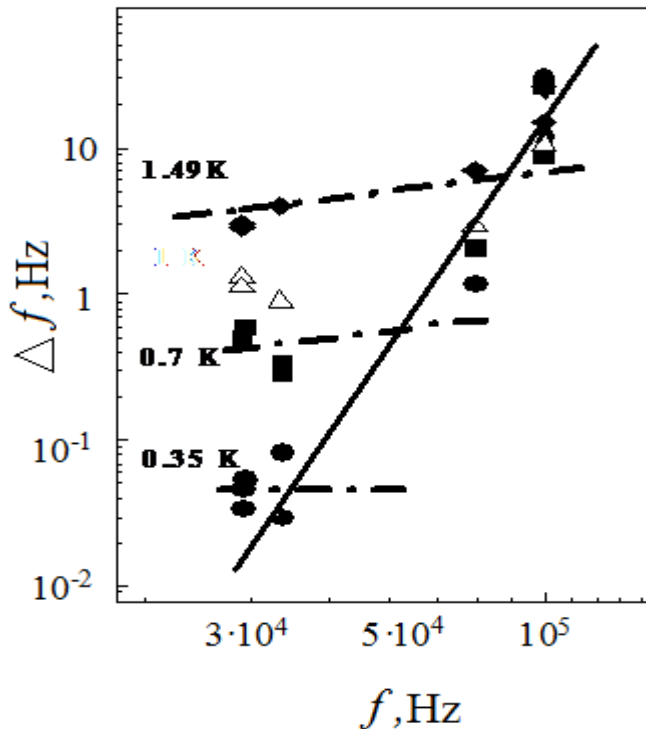


Рис. 3. Залежність ширини резонансу камертонів від їх резонансної частоти при температурах 1,49; 1,0; 0,7 та 0,35 К. Суцільна лінія – розрахунок впливу акустичного випромінювання (дивитися в тексті).

(суцільна лінія). При зниженні температури частота, що відповідає переходу між цими механізмами, зміщується в сторону менших частот. Цю зміну добре видно на температурній залежності ширини резонансу. Було виявлено, що

ніжок камертона і c_1 – швидкість першого звуку. Розрахунок з використанням виразу (1) наведено на рис. 3 суцільною лінією. Для дослідження акустичного випромінювання було вибрано кварцові камертони у широкому частотному діапазоні: 32, 38, 77 і 99 кГц. Особливу увагу було приділено умовам, за яких у дисипації домінує акустичне випромінювання. Експериментальні результати, що отримані при фіксованих температурах, наведені на рис. 3. На рис. 3 видно, що при $T=1,49$ К та частотах коливань f , менших за 90 кГц, основним дисипативним механізмом буде в'язке тертя (штрих-пунктирна лінія), а для частот $f \geq 90$ кГц відбувається зміна основного режиму дисипації з в'язкого тертя на акустичне випромінювання

акустичне випромінювання не спостерігається, якщо камертон помістити в комірку, розмір якої менше за довжину хвилі генерованого акустичного випромінювання. Також було проаналізовано вплив акустичного випромінювання на ефективну масу ^3He II, який коливається разом з ніжками камертона.

У **третьому розділі** «Сильно неоднорідні надплинні рідини» наведено огляд літератури, який присвячений опису та створенню нестабільності в звичайних та надплинних розчинах ^3He - ^4He за допомогою теплового потоку (Q). Потік тепла в надплинному розчині спрямований знизу вверх та викликає вертикальний градієнт температури (∇T) і концентрації (∇x), причому важча надплинна компонента рухається до нагрівача, а легша нормальна компонента (^3He) – до холодної частини комірки, збільшуючи концентрацію розчину, що повинно призводити до більшої механічної стійкості розчину. Така поведінка спостерігалася для розчину з 5 % ^3He у всьому діапазоні температур і теплових потужностей. Однак в експериментах з розчинами з 9,5 % та 9,8 % ^3He при $T \leq 0,45$ K спостерігалася нестійкість, яка визначалася на залежностях $\nabla T(Q)$ та $\nabla x(Q)$ за відхиленнями від лінійної залежності. В експерименті з розчинами з

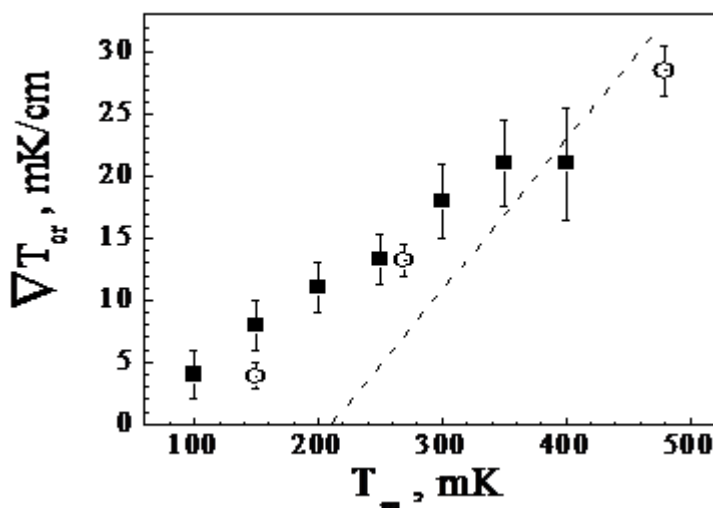


Рис. 4. Градієнт температури, який відповідає початку конвективної течії в залежності від середньої температури розчину T_m .

ною лінією. Аналіз стійкості розчину в присутності ∇T та ∇x проведено в термінах чисел Релея (Ra) та Марангоні (Ma). Виявлено, що в усьому температурному інтервалі число Релея змінюється від 10^7 при 0,1 K до 10^9 при 0,4 K. При відсутності механічної рівноваги розчину початок конвекційної течії відбувався б при набагато менших ∇T . Найбільш зручним для аналізу внеску міжфазної межі є число Марангоні, яке враховує капілярні ефекти на межі фаз розшарованого розчину, кінематичну в'язкість розчину ν , температуропровідність χ обох фаз та має наступний вигляд:

$$Ma = \frac{\alpha \Delta T h^2}{\rho \nu \chi}, \quad (2)$$

9,5% і 9,8% ^3He істотним виявилось те, що концентрація ^3He в холодній верхній частині комірки збільшувалася зі зростанням ∇T , тому при $T \sim 0,45$ K починалося розшарування розчину на слабку та концентровану фази. Температурна залежність градієнтів температури, при яких з'являються нестійкості рідини, наведені на рис. 3. Знаючи геометричні розміри комірки та ∇x , можна визначити ∇T при якому відбувається розшарування (∇T_s). На рис. 4 такий розрахунок наведено пунктирною лінією.

де α – поверхневий натяг, h – товщина фази. Температурна залежність числа Марангоні для обох фаз наведена на рис. 5. Для звичайних рідин і газів критичне число Ma , для якого настає нестійкість межі, досягає 78 (Г.З. Гершуні та інш., 1972), при його перевищенні з'являється нестійкість рідини, що

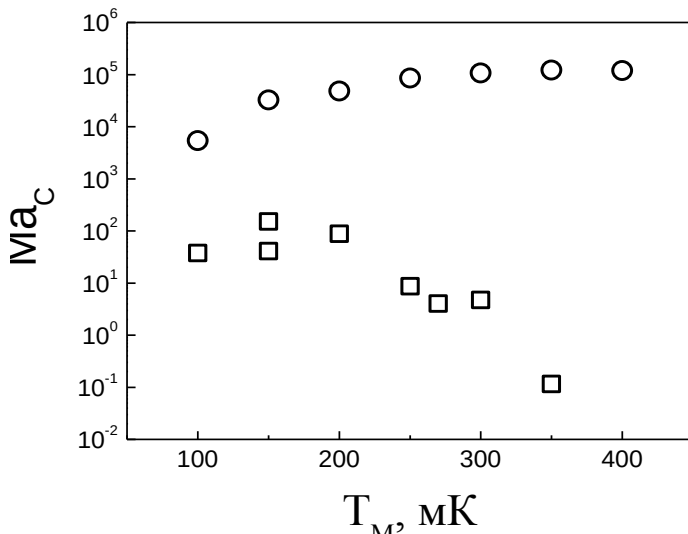


Рис. 5. Температурна залежність критичних чисел Марангоні для концентрованої ($\square$) та розведеної ($\circ$) фаз.

$Nu = \kappa_{eff}/\kappa$ від числа Релея є степеневою, причому показник степеня дорівнює $0,31 \pm 0,03$, що близько до такого показника степеня $1/3$ при виникненні конвекційної турбулентності (F.H. Busse, 1968).

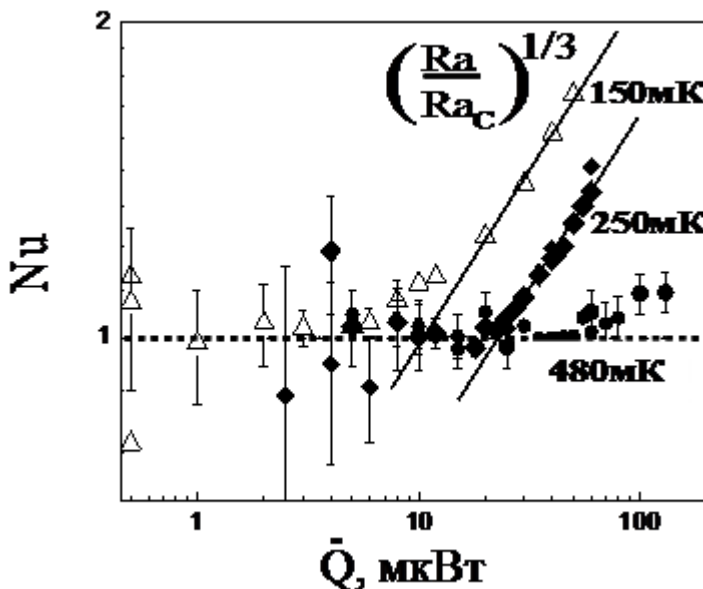


Рис. 6. Залежності числа Нусельта від потужності теплового потоку.

зародка і розшарування розчину. Концентрація розчину і величина пересичення збігаються з наявними в літературі даними та з теоретичним розрахунком.

визначається капілярними силами. Як видно на рис. 5, ∇T в концентрованій фазі не є достатнім для збудження нестійкості межі, причому число Марангоні для нижньої розведеної фази на кілька порядків більше критичного, що може свідчити про появу конвекційної течії, яка викликана нестабільністю межі фаз.

Для в'яснення механізму розвитку нестійкості доцільно розглянути число Нусельта. Як показав аналіз, залежність числа Нусельта

Це добре видно в подвійному логарифмічному масштабі на рис. 6, нахил суцільних прямих якраз відповідає степеню $0,31$. Процес розшарування супроводжується спочатку пересиченням розчину, а потім відбувається гетерогенне зародкоутворення, центрами якого є квантовані вихри. Зі збільшенням концентрації розчину у верхній частині комірки зменшується висота енергетичного бар'єра для такого зародка і при $x = 10,67\%$ ^3He бар'єр відсутній, що призводить до зростання

В надплинній рідині наявність градієнта температури вздовж межі фаз не тільки збуджує термокапілярні ефекти, але і викликає зустрічні потоки надплинної та нормальної компонент рідини, що в свою чергу може викликати нестійкість Кельвіна - Гельмгольца. В експерименті товщина верхньої концентрованої фази збільшується зі зменшенням температури, що веде до того, що критична швидкість течії збільшується з пониженням температури та при $T = 0,1$ К становить 6,3 см/с.

Змістом **четвертого розділу** «Рухливість межі фаз розшарованого розчину $^3\text{He} - ^4\text{He}$ при наднизьких температурах» є оригінальні результати щодо руху межі фаз розшарованого надплинного насиченого ізотопічного розчину при наднизьких температурах під впливом акустичних хвиль.

Наведено виміряні температурні залежності коефіцієнтів проходження і відбиття акустичної хвилі від межі фаз. Частота акустичної хвилі, що викликала рух межі фаз, була 10 МГц. Значення коефіцієнтів проходження та відбиття звукової хвилі наведено на рис. 7 для двох експериментів.

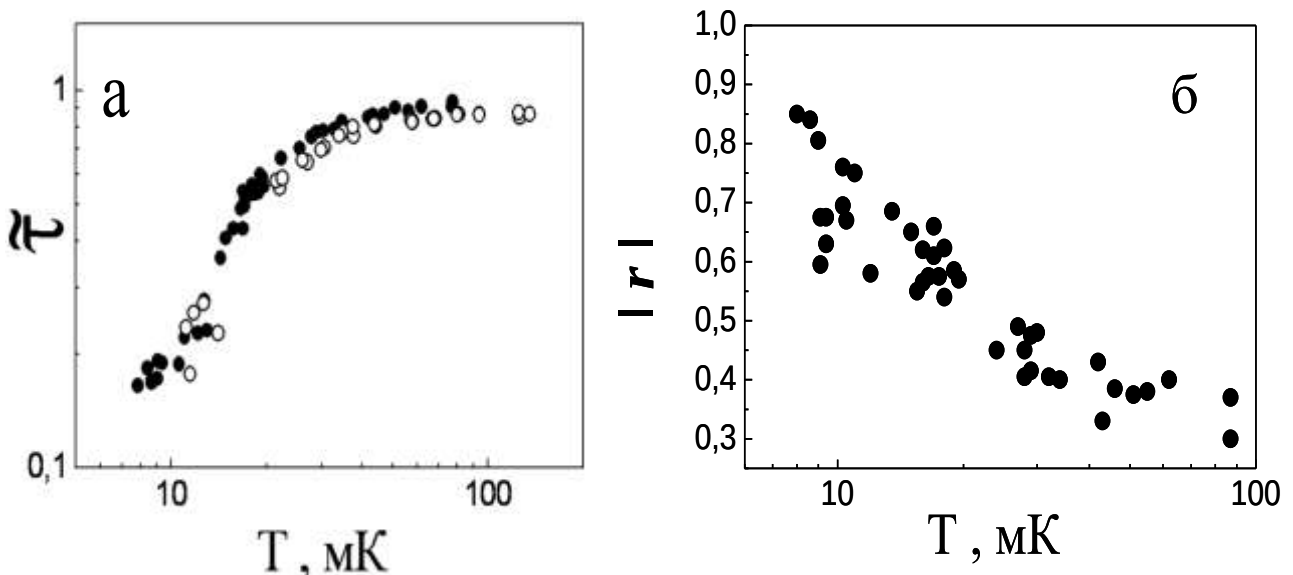


Рис. 7. Температурна залежність відносних коефіцієнтів проходження (а) та відбиття хвилі звуку (б), що поширюється з розведеної в концентровану фазу.

Відмінністю між експериментами було те, що в одному з них було виконано умову максимальної горизонтальності приймача і випромінювача звуку, що досягалося юстуванням плити, на якій кріпився кріостат, за умовою максимуму амплітуди сигналу звуку, який пройшов межу, або відбився від неї. ● – Дані відносяться до найкращої горизонтальності і ○ – експериментальні значення при відхиленні від горизонтальності на кут $2 \cdot 10^{-3}$ градуси.

Вирази для коефіцієнтів проходження $\tau_{d \rightarrow c}$ та відбиття звуку $r_{c \rightarrow d}$ мають вигляд:

$$\tau_{d \rightarrow c} = \frac{2Y_c}{Y_c + Y_d + Y_c Y_d \xi_\omega}, \quad r_{c \rightarrow d} = \frac{Y_c - Y_d - Y_c Y_d \xi_\omega}{Y_c + Y_d + Y_c Y_d \xi_\omega}, \quad (3)$$

де $Y_c = u_c \rho_c$ та $Y_d = u_d \rho_d$ – відповідно акустичні імпеданси концентрованої та розбавленої фаз, u_c та u_d – швидкості звуку, ρ_c та ρ_d – густини фаз, ξ_ω –

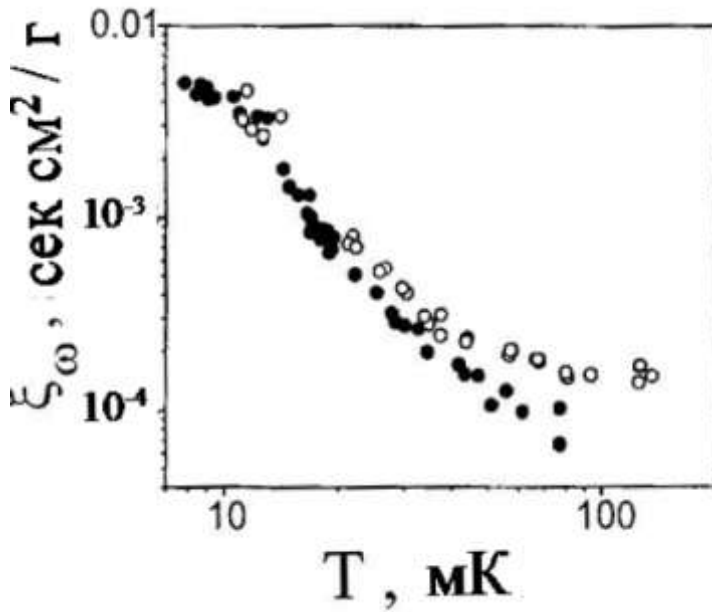


Рис. 8. Температурні залежності кінетичного коефіцієнта рухливості межі фаз.

підладжуватися під хвилю тиску. У той же самий час коефіцієнт відбиття (рис. 7б) зі зниженням температури наближається до одиниці, тобто акустична хвиля починає практично повністю відбиватися від межі.

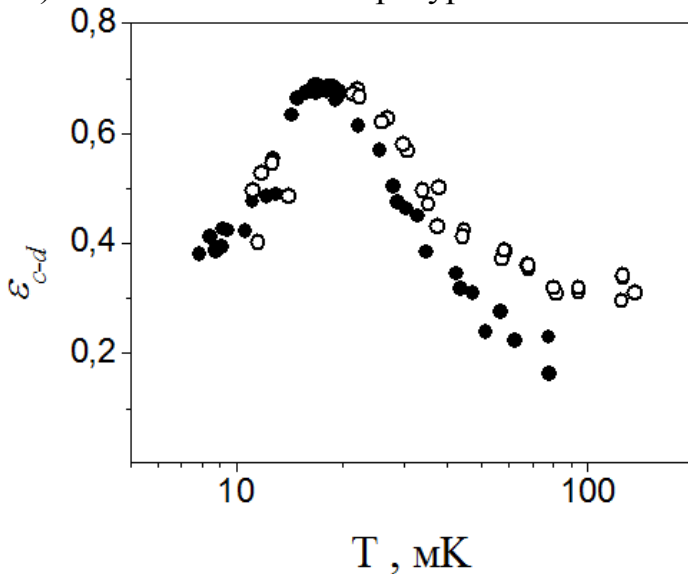


Рис. 9. Температурні залежність відносних втрат звукової хвилі при проходженні через межу фаз розшарованих розчинів.

енергію. Втрати енергії в звуковій хвилі у відношенні до енергії сигналу записуються у вигляді $\varepsilon_{c-d} = Y_c \tau_{c-d}^2 \xi_\omega$ при проходженні акустичної хвилі з концентрованої фази в розведену і $\varepsilon_{d-c} = Y_d \tau_{d-c}^2 \xi_\omega$ з розведеної в концентровану.

кінетичний коефіцієнт рухливості. Величину коефіцієнта проходження зручно представити в універсальному вигляді, а саме: нормувати на величину коефіцієнта проходження незмішуваної двофазної рідини $\tau_0 = 2Y_c/(Y_c + Y_d)$ (рис. 7а), таким чином $\tilde{\tau} = \tau_{d \rightarrow c}/\tau_0$. Видно, що при $T < 0,07$ К цей коефіцієнт починає зменшуватися з температурою, що свідчить про збільшення коефіцієнта рухливості. Зменшення коефіцієнта проходження свідчить про те, що межа фаз починає підкладжуватися під хвилю тиску. У той же самий час коефіцієнт відбиття (рис. 7б) зі зниженням температури наближається до одиниці, тобто акустична хвиля починає практично повністю відбиватися від межі.

З використанням рівнянь (3) визначено значення кінетичного коефіцієнта рухливості ξ_ω , температурна залежність якого показана на рис. 8. Зі зменшенням температури коефіцієнт рухливості збільшується, його залежність становиться близькою до T^2 , а за величиною коефіцієнт рухливості майже на чотири порядки більше теоретичного значення (S.N. Burmistrov, T. Satoh, 1999). Хвиля звуку, що пройшла через поверхню розділу двох фаз, втрачає

Температурна залежність відносних втрат енергії акустичної хвилі наведена на рис. 9. Така залежність має максимум при температурі, близькій до 0,02 К. Природа цього максимуму до кінця не зрозуміла. Слід відзначити, що в області температур, близьких до максимуму на рис. 9, відбувається перехід від гідродинамічного до балістичного режиму розсіювання домішкових квазічастинок ^3He . Можна припустити, що наявність максимуму пов'язана з цим переходом.

У п'ятому розділі «Надплинна турбулентність в ^4He » розглядається проблема турбулентності в надплинному гелії. Наведено існуючі теоретичні уявлення і способи досліджень турбулентності при наднизьких температурах.

Для досліджень була обрана методика осцилюючого кварцового камертона. Вимірювалися амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) камертонів при різних збуджуючих напругах (U_m): спочатку в вакуумі для знаходження п'єзоелектричної постійної (a), а потім – в He II . З отриманих АЧХ визначалася амплітуда швидкості коливань камертона ($v = I_0/a$, де I_0 - амплітуда сигналу) на резонансній частоті. Знаючи збуджуючу напругу, можна було визначити амплітуду сили, яка збуджує коливання ($F = aU/2$), що дозволяло побудувати

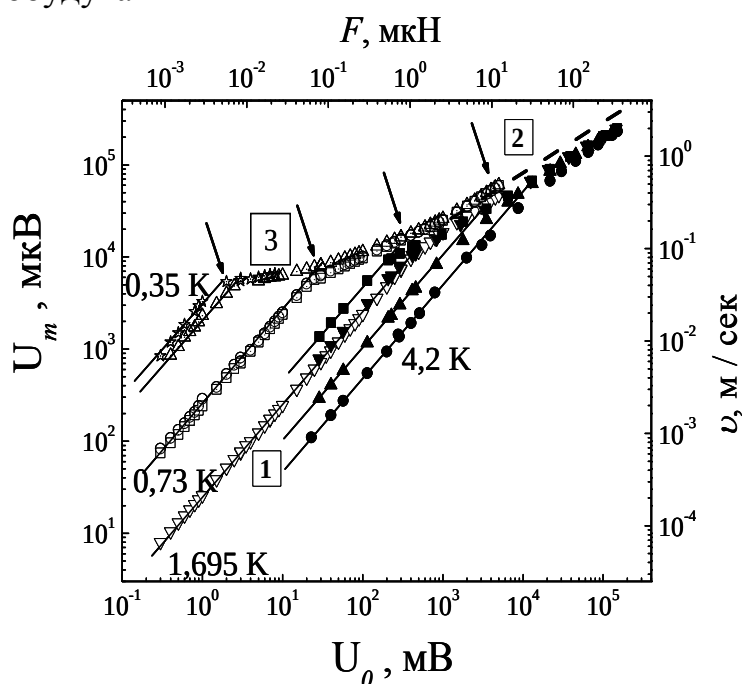


Рис. 10. Залежність швидкості коливань камертона від сили, що збуджує коливання при фіксованих температурах.

такого проміжного режиму, можливо, пов'язана з ростом густини квантових вихрів, що призводить до додаткового дисипативного механізму – взаємного тертя, тобто розсіювання теплових збуджень на квантованих вихрах в надплинному гелії. Подальше збільшення швидкості призводить до зміни між режимами 3 і 2.

На рис. 11 наведені критичні швидкості переходу від ламінарного режиму течії до турбулентного режиму течії, виміряні в даній роботі – $\bullet$. Для

залежність $v(F)$.

Приклад таких залежностей в He II наведено на рис. 10. На рисунку можна виділити три режими течії: при високих температурах вище за 1 К і малих v спостерігається ламінарна течія $F \sim v$ (на рис. 10 відповідає цифрі 1). При збільшенні швидкості коливань ламінарна течія замінюється турбулентною, а залежність стає квадратичною $F \sim v^2$ (на рис. 10 відповідає цифрі 2). При температурах нижче за 1 К ламінарна течія змінюється на проміжний режим течії, при цьому $F \sim v^3$ (цифра 3 на рис. 10). Поява

порівняння наведені дані для кварцового камертона - $\diamond$ (M. Blazkova et al., 2007); сіточки – $\blacktriangle$ (H.A. Nichol et al., 2004) і дротинки – $\circ$ (H. Yano et al., 2007) як видно з рис. 11, дані різних робіт добре узгоджуються між собою.

При підвищених температурах $T > 1$ К величина критичної швидкості переходу між ламінарною та турбулентною течіями швидко зменшується з

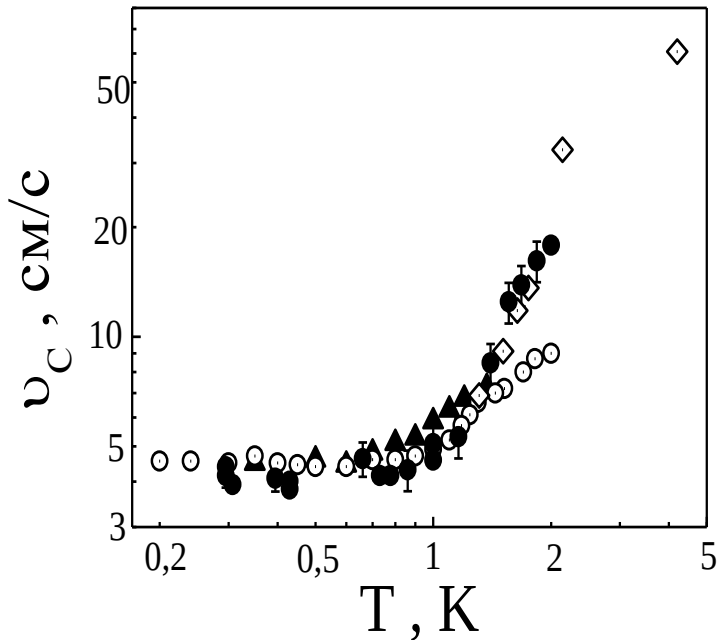


Рис. 11. Температурні залежності критичної швидкості потоку для тіл з різною геометрією (дивитися в тексті).

температурою.

Але при температурах, за яких виникає проміжний режим, критична швидкість практично не змінюється, а за величиною має добре узгодження з наявними в літературі даними про залежність $v_c(T)$ для тіл з різною геометрією (дротинка, сіточка).

Виникнення проміжного режиму так само ж спостерігається на АЧХ камертона на рис. 12 як плато (рис. 12 III і рис. 10, ділянка 3), яке з'являється поблизу резонансної частоти. У той же час при $T > 1$ К на АЧХ спостерігаються тільки режими I - ламінарної течії і режим II - турбулентний режим течії. При дослідженнях турбулентності в класичних рідинах і газах для порівняння турбулентних пото-

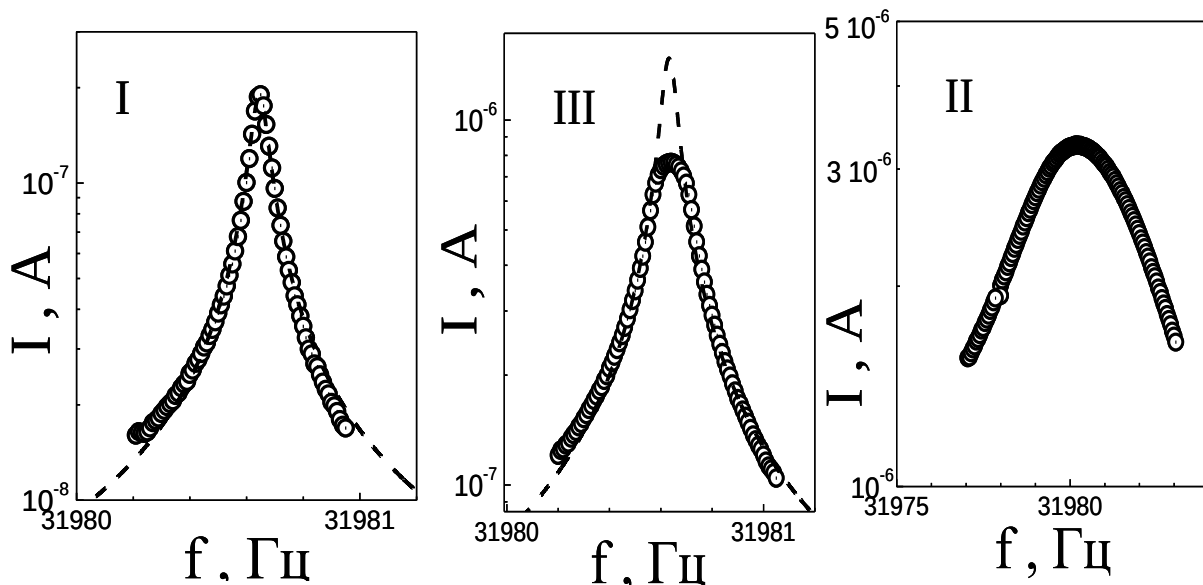


Рис. 12. Характерні амплітудно-частотні характеристики кварцового камертона.

ків в різних системах використовують залежність коефіцієнта лобового опору від числа Рейнольдса ($Re = vR/\nu$, де R – характерний розмір тіла, що обтікається

стаціонарною течією). Ця величина дорівнює відношенню розсіяної енергії до кінетичної енергії потоку рідини і має вигляд: $C_d = 2F/(\rho v^2 S)$. У даній роботі аналіз такої залежності був проведений для осцилюючого камертона, зану-

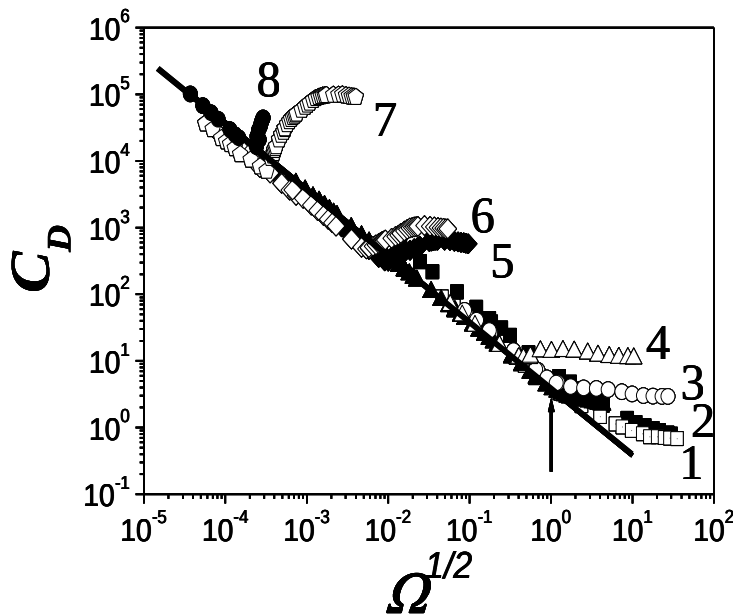


Рис. 13. Залежність коефіцієнта лобового опору від ефективного числа Рейнольдса.

реного в He II, при різних температурах. При проведенні аналізу необхідно було з'ясувати, який характерний розмір можна використувати для розрахунку числа Рейнольдса. Виявилось, що доцільно замість характерного геометричного розміру тіла використати амплітуду коливань камертона (ℓ). Також були враховані властивості досліджуваної надплинної системи (до числа Рейнольдса та коефіцієнта опору входять в'язкість та густина нормальної компоненти).

Як відомо, в He II за дисипативні процеси відповідає нормальна компонента з густиною ρ_n і в'язкістю ν_n . В цьому випадку ефективне число Рейнольдса Ω і коефіцієнт лобового опору C_d мають вигляд:

$$\Omega = \frac{\nu \ell}{\nu_n}; \quad C_d = \frac{2F}{\rho_n \nu^2 S} \quad (4)$$

Залежність C_d від Ω наведена на рис. 13. Нумерація відповідає різним температурам: 4,2 К (1); 2,144 К (2); 1,642 К (3); 1,305 К (4); 0,778 К (5); 0,731 К (6); 0,43 К (7); 0,35 К (8). Для чисел Рейнольдса менших за критичне значення (ламінарна течія), коефіцієнт лобового опору має універсальну залежність для всіх досліджених температур (суцільна лінія).

При температурах вищих за 1 К перехід від ламінарної до турбулентної течії відбувається подібно до звичайних рідин та газів, при $\Omega \geq 1$, а тому при турбулентній течії сила тертя збільшується пропорційно квадрату швидкості. При цьому коефіцієнт опору плавно відхиляється від лінії і стає практично незалежним від числа Рейнольдса. При температурі менше 1 К перехід до турбулентної течії спостерігається у вигляді зростання коефіцієнта опору при $\Omega \ll 1$.

Така поведінка C_d обумовлена зростанням густини квантованих вихрів і розсіянням на них теплових збуджень – взаємне тертя. Таким чином, спостерігається турбулентність надплинної компоненти – квантова турбулентність. Поява акустичного випромінювання від осцилюючого камертона призводить до збільшення критичної швидкості виникнення

турбулентної течії, а характер переходу до такої течії при цьому подібний до класичних рідин та газів.

У **шостому розділі** «Особливості турбулентної течії в надплинних розчинах $^3\text{He} - ^4\text{He}$ » приведено результати вперше проведених досліджень переходу від ламінарної до турбулентної течії у 5 % надплинному розчині $^3\text{He} - ^4\text{He}$ за допомогою методу осцилюючого камертона в області температур від 2,5 К до 0,3 К. Необхідно зауважити, що завдяки домішці ^3He кінетичні властивості розчинів $^3\text{He} - ^4\text{He}$ різко відрізняються від властивостей He II . Так, якщо в He II при $T < 0,7$ К настає балістичний режим розсіювання, то в розчині $^3\text{He} - ^4\text{He}$ розсіювання визначається в'язким тертям аж до дуже низьких температур. Крім того, густина нормальної компоненти розчину визначається концентрацією ^3He та при $T < 1$ К стає постійною, тоді як в He II вона зменшується як T^4 . Таким чином, при як завгодно низькій температурі в надплинній рідині завжди присутня нормальна компонента, що в свою чергу викликає інтерес до вивчення її впливу на турбулентність в такій рідині.

В експерименті вимірювалися АЧХ камертона при різних збуджуючих напругах (20 В – 0,001 В) при фіксованих температурах. Особливістю даних

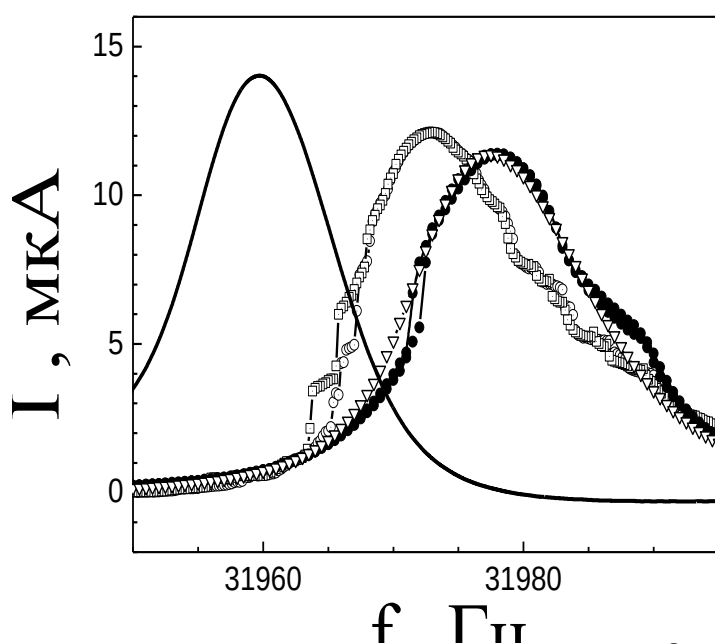


Рис. 14. АЧХ камертона в 5 % розчині $^3\text{He} - ^4\text{He}$ при температурах: 1,03 К, 0,71 К, 0,35 К та He II .

пов'язана з адсорбцією домішок (атомів ^3He) в корі квантованих вихрів. Причому температура початку конденсації атомів ^3He збігається з раніше виміряною (R.M. Ostermeier, W.I. Glaberson, 1976). Необхідно відзначити, що такі нерегулярності не спостерігаються при швидкостях коливань, які збігаються з критичними для He II ($v_c \sim 5$ см/с).

Перехід від ламінарної до турбулентної течії визначався за відхиленням від лінійності на залежності $v(F)$. Температурна залежність критичних швидкостей переходу наведена на рис. 15 (○). Крім того, на рис. 15 показана

досліджень є поява нерегулярності на АЧХ при температурах нижчих за 0,9 К. Приклад таких АЧХ наведено на рис. 14, де можна побачити, що при $T = 1,03$ К (▽) нерегулярності в вигляді сходенок на резонансній кривій не спостерігаються, тоді як при $T = 0,71$ (●) і 0,35 (○, □) сходенки добре виражені та зі зменшенням температури кількість сходенок на АЧХ збільшується. Суцільною кривою показана АЧХ в He II при $T = 0,35$ К. Поява подібних нерегулярностей

залежність v_c для He II (●) і область появи нерегулярностей на АЧХ (зліва від пунктирної лінії).

При високих температурах поведінка v_c переходу в розчині ^3He - ^4He близька до поведінки v_c в He II. Але зі зниженням температури різниця збіль-

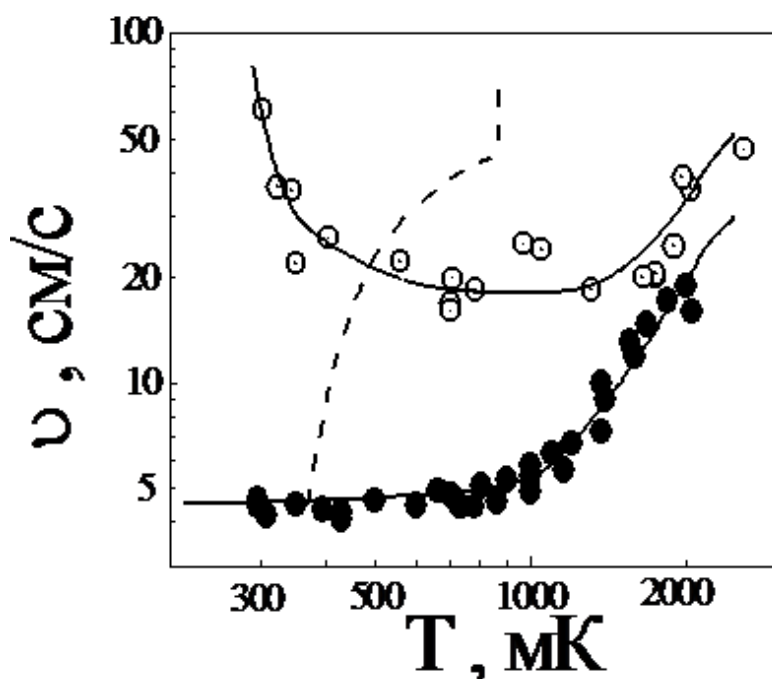


Рис. 15. Температурна залежність критичної швидкості переходу в 5 % розчині ^3He в ^4He .

відомо, що поверхня графайлу атомно гладка, а кристаліти мають розмір по-

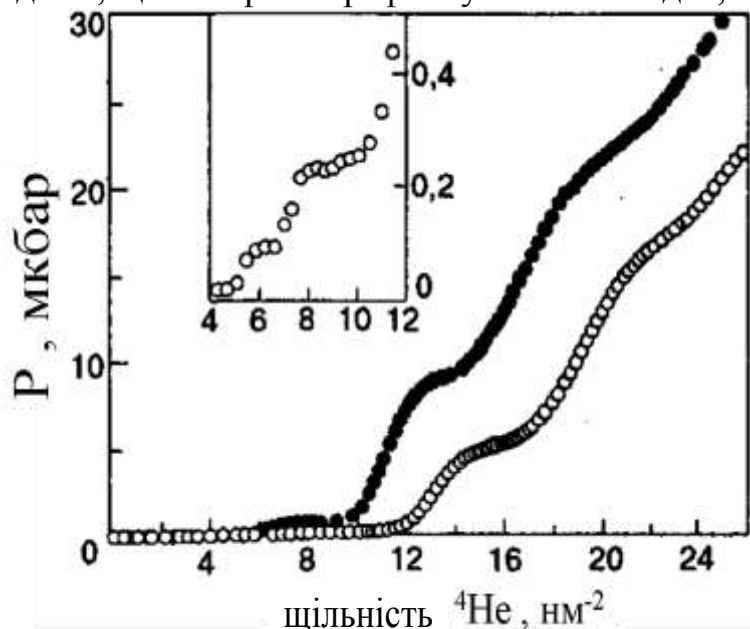


Рис. 16. Ізотерми адсорбції плівок ^4He при температурі 940 мК на графайлі з двома (відкриті точки) і трьома (заповнені точки) додатковими шарами дейтероводню.

адсорбції (рис. 16). Ізотерми адсорбції

шувється і при 0,3 К критична швидкість стає на порядок вище критичної швидкості в чистому надплинному гелії.

У сьомому розділі

«Двовимірна надплинність ^4He в полі сил Ван-дер Ваальса» містяться результати оригінальних досліджень температури надплинного переходу в атомних плівках гелію на поверхні графайлу з дискретно змінними силами Ван-дер-Ваальса. Графойл являв собою спресовану таблетку і складався з атомно гладких лусочок кристалітів графіту. Добре

відомо, що поверхня графайлу атомно гладка, а кристаліти мають розмір порядку сотні ангстрем. Це дозволяє провести дослідження в умовах однорідних атомних плівок. За оцінками неоднорідність, пов'язана з межами кристалітів на поверхні, становить близько 2 % від загальної площі поверхні, зайнятої речовиною в першому атомному шарі ^4He , даючи відносно невеликий внесок в ефекти розширення, пов'язані з надтекучим переходом. Важливим є те, що атомні плівки ^4He ростуть пошарово, що контролюється в експериментах з вимірювання ізоterm вимірювалися за допомогою

високочутливого датчика тиску, розташованого безпосередньо на плиті торсійного осцилятора, і одночасно контролювалися за вимірюваннями періоду коливань осцилятора. Кількість адсорбованого ^4He визначала за допомогою

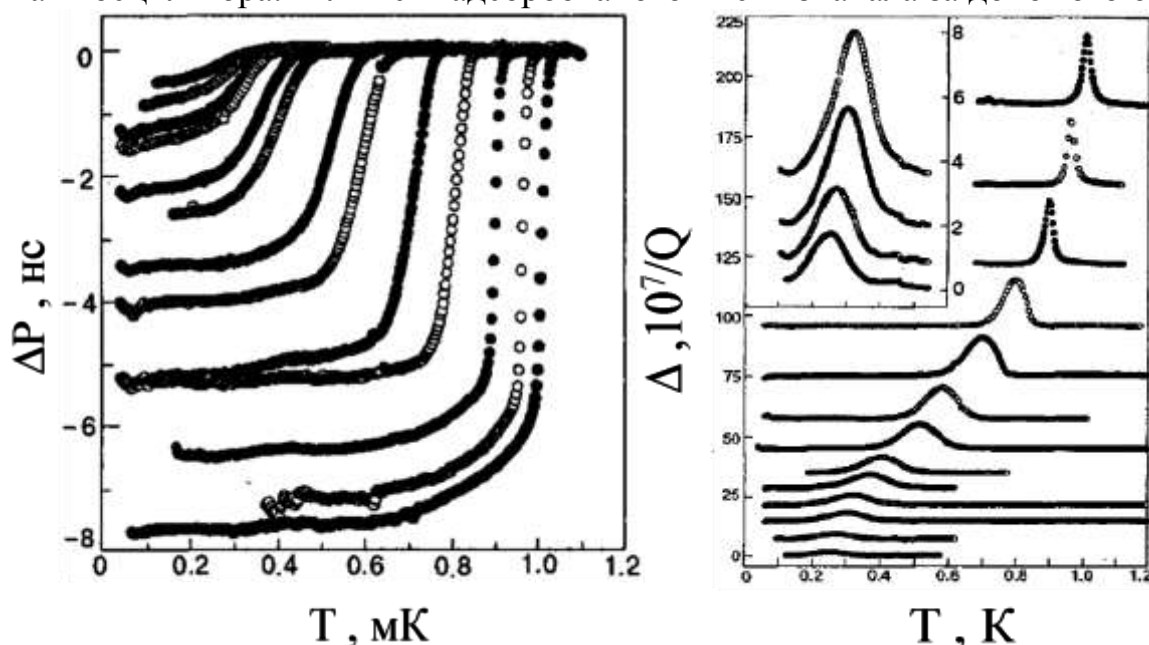


Рис. 17. Стрибок періоду і максимуму поглинання коливань торсійного осцилятора при переході в надплинний стан плівок ^4He , розташованих на трьох додаткових шарах дейтероводню на графойлі.

каліброваного об'єму і тиску в ньому. Щоб змінити сили Ван-дер-Ваальса, на поверхню графойлу наносилися два (три) шари дейтероводню HD. Вибір HD

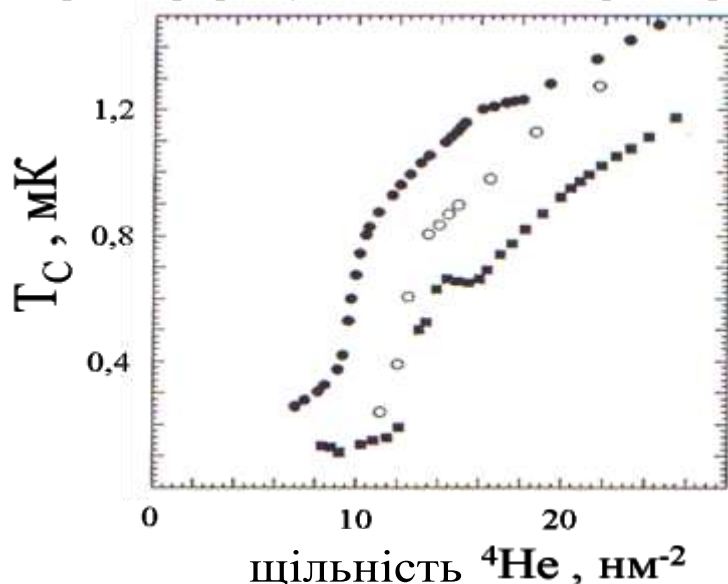


Рис. 18. Температура надплинного переходу в залежності від щільності атомарної плівки гелію.

17). Температура надплинного переходу визначалася за мінімумом амплітуди сигналу, що відповідало різкому зменшенню періоду коливань і початку проковзування речовини, адсорбованої на поверхні графойла тобто свідчило

як покриття обумовлений необхідністю мінімізувати виділення тепла за рахунок орто-пара конверсії в процесі вимірювань при наднизьких температурах. Виміри проводилися за допомогою методики торсійного осцилятора з резонансною частотою коливань 1056 Гц і добротністю $\sim 10^6$. В експериментах вимірювалася температурна залежність періоду і амплітуди коливань торсійного осцилятора при різній щільності атомарної плівки гелію (рис.

про виникнення надплинності. Температура надплинного переходу в двовимірних плівках гелію в залежності від щільності речовини наведена на

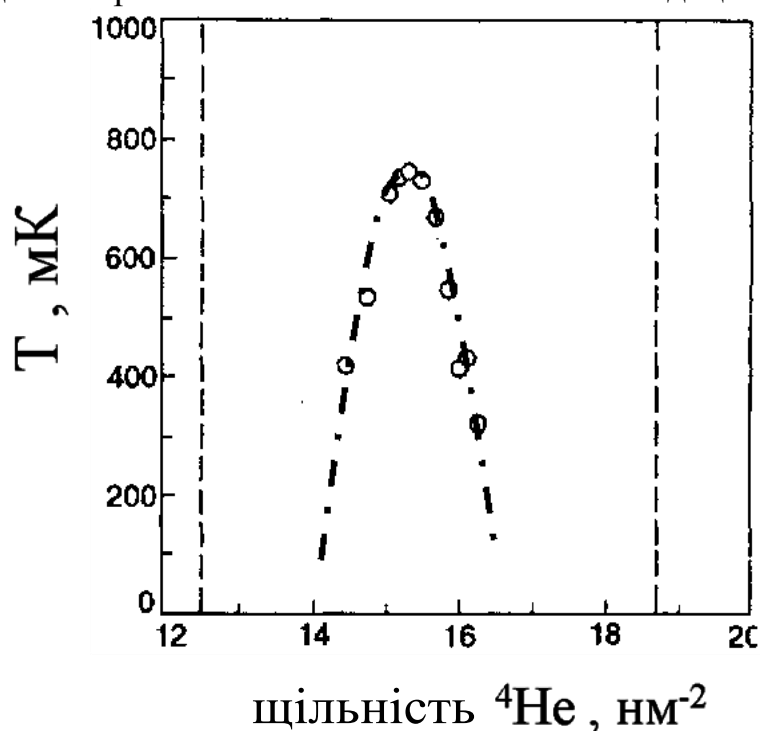


Рис. 19. Температурна залежність додаткових піків від щільності атомарної плівки гелію.

додаткові піки дисипації (мінімуми амплітуди сигналу). Температура, при якій спостерігається додатковий пік дисипації, в залежності від щільності покриття наведена на рис. 19. Наведена залежність пов'язана з двовимірною конденсацією в плівках гелію в вигляді калюж. Максимальна температура конденсації гелію складає $T = 0,8 \text{ K}$, що збігається з експериментальними даними, отриманими за допомогою вимірювання теплоємності трьох гелієвих шарів на чистому графайлі (P.S. Ebey and O.E. Vilches, 1995). Зростання третього шару плівки гелію, вирощеної на двох шарах HD, відбувається рівномірно, без конденсації. На трьох додаткових шарах HD зріст другого і третього шару рідких плівок гелію так само відбувається рівномірно, без двовимірної конденсації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу проблему фізики низьких температур: виявлено закономірності кінетичних та динамічних процесів в рідкому гелії та його ізотопічних розчинах під впливом градієнтів температур і тиску та зміни концентрації ізотопу.

Серед результатів, отриманих в ході виконання роботи, найбільш пріоритетними є наступні:

1. Показано, що тепловий потік знизу-вгору викликає градієнти температури і концентрації в 5 % розчині та призводить до стійкого розподілу

рис. 18. На чистому графайлі (■), з двома шарами HD (○) і з трьома шарами HD (●). Як видно на рис. 18, збільшення кількості додаткових шарів HD призводить до збільшення температури переходу в надплинний стан в двовимірних плівках гелію. Додавання додаткових двох (трьох) шарів HD призводить до того, що перший шар гелію є твердим, а наступні шари рідкі. Особливість вимірювань на двох або трьох шарах HD полягає в тому, що при двох шарах HD при зростанні другого рідкого шару ^4He спостерігалися

густини таким чином, що менш густий розчин знаходиться вгорі. В розчинах з концентраціями 9,5 % та 9,8 % ^3He за рахунок градієнтів температури і концентрації спостерігається на початку гетерогенне зародкоутворення на квантованих вихрах, а потім – розшарування розчину на більш легку і важку фази, що призводить до появи конвекційної турбулентності.

2. Отримано результати про коефіцієнти проходження та відбиття акустичної хвилі на межі фаз розшарованих розчинів ^3He - ^4He . Це дозволило визначити температурну залежність коефіцієнта рухливості межі фаз при розшаруванні розчинів в інтервалі температур від 0,2 K до 0,01 K. Показано, що при температурі 0,01 K експериментальна величина коефіцієнта рухливості перевищує теоретичне значення більш ніж в 10^4 раз.

3. Визначено і описано, в межах сучасних теоретичних уявлень, температурну залежність коефіцієнта опору для осцилюючого камертона при ламінарній течії в широкому діапазоні частот як для гідродинамічного режиму, так і для балістичного розсіювання теплових збуджень.

4. За допомогою прямого акустичного вимірювання показано, що осцилюючий камертон є квадрупольним випромінювачем акустичної хвилі, амплітуда якої залежить від швидкості і частоти коливань камертона та наявності резонансних умов. Встановлено умови, за яких внеском акустичного випромінювання в дисипації можна знехтувати в порівнянні з внеском в'язкого тертя або балістичного розсіювання теплових збуджень.

5. За допомогою осцилюючого камертона виміряна критична швидкість переходу від ламінарної до турбулентної течії в чистому ^4He та 5 % розчині ^3He в ^4He в інтервалі температур від 2,5 K до 0,05 K, та досліджена адсорбція атомів ^3He в 5 % розчині ^3He в ^4He на корях квантованих вихрів та визначена область температур і швидкостей, при яких вона відбувається.

6. Визначено, що густина нормальної компоненти надплинної рідині впливає на величину критичної швидкості з збільшенням густини нормальної компоненти зростає критична швидкість переходу від ламінарної до турбулентної течії. Більш того, домішки ^3He , які при наднизьких температурах визначають величину густини нормальної компоненти, значно збільшують критичну швидкість потоку.

7. Показано, що при турбулентній течії He II в області температур ($T < 0,7\text{K}$) балістичного розсіювання теплових збуджень виявлен проміжний режим течії, в якому спостерігається взаємодія надплинної та нормальної компонент за рахунок появи квантованих вихрів і розсіювання теплових збуджень на них, що призводить до взаємного тертя нормальної компоненти на вихрах.

8. За допомогою методики торсійного коливання показано, що температура надплинного переходу в атомарних плівках ^4He істотно залежить від кількості шарів дейтероводню, який знаходиться між атомарної плівкою ^4He та підкладкою, причому збільшення кількості шарів дейтероводню

призводить до зменшення щільності, при якій відбувається перехід до надплинного стану в двовимірних плівках гелію. Було спостережено двовимірну конденсацію в другому рідкому шарі гелію, розташованого на двох додаткових шарах дейтероводню.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ray R. Superfluidity of thin ^4He film on atomically flat surfaces / R. Ray, **G.A. Sheshin**, J. Nyeki, B. Cowan, J. Saunders // Czech. J. Phys. – 1996. – Vol. 46, Suppl S1. – P. 427-428.
2. Nyeki J. Structure and superfluidity of ^4He films on plated graphite / J. Nyeki, R. Ray, **G. Sheshin**, V. Maidanov, V. Mikheev, B. Cowan, J. Saunders // ФНТ – 1997. – Т. 23, № 5/6. – P.515-526.
3. Burmistrov S. On the structure of quantized vortices in a saturated liquid ^3He - ^4He mixture / S. Burmistrov, V. Chagovets, L. Dubovskii, E. Rudavskii, T. Satoh, **G. Sheshin** // Physica B. – 2000. – Vol. 284-288, № 1. – P.321-322.
4. Abe H. Transmission of first sound wave at the interface of phase-separated ^3He - ^4He mixtures / H. Abe, M. Nakazava, **G. Sheshin**, T. Satoh // J. Low Temp.Phys. – 2000. – Vol. 121, № 5/6. – P. 315-322.
5. Sheshin G. Transmission and reflection of first sound wave at the interface of phase-separated ^3He - ^4He mixtures. / **G. Sheshin**, H. Abe, M. Nakazava, T. Satoh // The Phys. Soc. of Japan (JPS) – 2000. – Vol. 55, № 1. – P. 674-674.
6. Задорожко А.А. Связь градиентов температуры и концентрации в сверхтекучих растворах ^3He - ^4He в стационарном режиме / А.А. Задорожко, Т.В. Калько, Э.Я. Рудавский, В.К. Чаговец, **Г.А. Шешин** // ФНТ – 2003. – Т. 29, № 4. – P.1367-374.
7. Задорожко А.А. Конвективная неустойчивость сверхтекучих растворов ^3He - ^4He . / А.А. Задорожко, Т.В. Калько, Э.Я. Рудавский, В.К. Чаговец, **Г.А. Шешин** // ФНТ – 2003. – Т. 29, № 8. – P.829-834.
8. Sheshin G. Thermal instability of superfluid phase-separated ^3He - ^4He solution heated from below / **G. Sheshin**, V. Chagovets, T. Kalko, A. Zadorozhko, K. Neoneta, E. Rudavskii, G. Sheshin // J. Low Temp.Phys. – 2005. – Vol. 138, № 1/2. – P. 301-308.
9. Задорожко А.А. Фазовое расслоение и тепловая неустойчивость сверхтекучих растворов ^3He - ^4He , нагреваемых снизу / А.А. Задорожко, Т.В. Калько, Э.Я. Рудавский, В.К. Чаговец, **Г.А. Шешин** // ФНТ – 2005. – Т. 31, № 2. – P. 134-140.
10. Sheshin G.A Thermal instability of stratified superfluid mixtures ^3He - ^4He under heating from below/ **G.A. Sheshin**, S.S. Sokolov // Journal of Molecular Liquids – 2006. – Vol.127. – P. 153-155.
11. Chagovets V. Temperature and concentration relaxation in phase-separated superfluid ^3He - ^4He mixtures / V. Chagovets, T. Kalko, K. Nemchenko, E. Rudavskii, **G. Sheshin**, A. Zadorozhko // J. Low Temp. Phys. – 2007. – Vol. 146, № 3/4. – P. 403-416.

12. Sheshin G. Phase separation and nucleation in superfluid mixtures of ^3He - ^4He at presence of a heat flow / **G. Sheshin**, V. Chagovets, T. Kalko, E. Rudavskii, A. Zadorozhko // J. Low Temp. Phys. – 2007. – Vol. 148, № 3/4. – P. 151-156.
13. Sheshin G. Convective turbulence in superfluid solutions ^3He - ^4He / **G. Sheshin**, V. Chagovets, T. Kalko, E. Rudavskii, A. Zadorozhko // J. Low Temp. Phys. – 2008. – Vol. 150, № 3/4. – P. 420-425.
14. Шешин Г.А. Особенности перехода к турбулентности в сверхтекучем ^4He при низких температурах / **Г.А. Шешин**, А.А. Задорожко, Э.Я. Рудавский, В.К. Чаговец, Л. Скрбек, М. Блажкова // ФНТ – 2008. – Т. 34, № 11. – P.1111-1121.
15. Chagovets V. Flow regimes of the superfluid helium caused by oscillating quartz tuning fork / V. Chagovets, I. Gritsenko, E. Rudavskii, **G. Sheshin**, A. Zadorozhko // J. of Physics: Conference Series. – 2009. – Vol.150. – P. 032014-1–032014-4.
16. Gritsenko I.A. Transition to turbulence and critical velocity in superfluid solution of ^3He in ^4He / I.A. Gritsenko, A.A. Zadorozhko, E.Y. Rudavskii, V.K. Chagovets, G.A. Sheshin // J. Low Temp. Phys. – 2010. – Vol. 158, № 5/6. – P. 450-455.
17. Гриценко И.А. Колебания кварцевого камертона в He II и коэффициент сопротивления / И.А. Гриценко, А.А. Задорожко, А.С. Неонета, В.К. Чаговец, **Г.А. Шешин** // ФНТ – 2011. – Т. 37, № 7. – P.695-702.
18. Schmoranz D. Acoustic emission by quartz tuning forks and other oscillating structures in cryogenic ^4He fluids / D. Schmoranz, M. La Mantia, **G. Sheshin**, I. Gritsenko, A. Zadorozhko, M. Rotter, L. Skrbek // J. Low Temp. Phys. – 2011. – Vol. 163, № 3/4. – P. 317-344.
19. Гриценко И.А. Механизмы диссипации колеблющегося кварцевого камертона в He II при повышенных давлениях / И.А. Гриценко, А.А. Задорожко, **Г.А. Шешин** // ФНТ – 2012. – Т. 38, № 12. – P.1395-1042.
20. Gritsenko I. Decay mechanisms of oscillating quartz tuning fork immersed in He II / I. Gritsenko, A. Zadorozhko, **G. Sheshin** // J. of Physics: Conference Series – 2012. – Vol.400. – P.012068-1–012068-4.
21. Gritsenko I. Frequency characteristics of a quartz tuning fork immersed in He II / I. Gritsenko, A. Zadorozhko, **G. Sheshin** // J. Low Temp. Phys. – 2013. – Vol. 171, № 3/4. – P. 194-199.
22. Sheshin G. Mutual interactions of oscillating quartz tuning forks in superfluid ^4He / **G. Sheshin**, I. Gritsenko, D. Schmoranz, L. Skrbek // ФНТ – 2013. – Т. 39, № 10. – P.1062-1067.
23. Gritsenko I. The influence of acoustic emission on the onset of turbulent flow in He II / I. Gritsenko, **G. Sheshin** // J. Low Temp. Phys. – 2014. – Vol. 175, № 1/2. – P. 91-96.
24. Гриценко И.А. Влияние акустического излучения на критическую скорость перехода к турбулентному течению в He II / И.А. Гриценко, **Г.А. Шешин** // ФНТ – 2014. – Т. 40, № 9. – P.1028-1034.

25. Гриценко И. Квантовая турбулентность: коэффициент сопротивления при колебаниях погруженного в He II кварцевого камертона / И. Гриценко, А. Цескис, **Г. Шешин** // ФНТ – 2015. – Т. 41, № 4. – С.338-342.
26. Superfluidity of thin ^4He film on atomically flat surfaces/ .R.Ray, J.Nyeki, **G. Sheshin**, B.Cowan, J.Saunders // Proc. Intern.Conf. LT-21, Czechoslovak, Прага, Чешская республика, 1996 г., P.97.
27. Dynamics of interface of phase-separated ^3He - ^4He mixtures / H.Abe, M.Nakazava, **G.Sheshin**, T.Satoh // Proceeding of the 2nd Workshop on «New Phenomena of Helium in the Low Dimensional Situation» 20-22 Dec. Atami, Japan, 1999, P.650.
28. Transmission and reflection of first sound wave at the interface of phase-separated ^3He - ^4He mixtures. / **G. Sheshin**, H. Abe, M. Nakazava, T. Satoh // Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan, v.55, Issue 1, Part 4, 2000, P.674.
29. Phase separation in ^3He - ^4He solutions under elevated pressures / E.Rudavskii V.Chagovets, G. Sheshin //«Физика жидкости. Современные проблемы» Тезисы конференции Киев, Украина, 2001, С.168.
30. Стационарные градиенты температуры и концентрации в сверхтекучих растворах ^3He - ^4He . / А.А.Задорожко, Т.В.Калько, Э.Я.Рудавский, В.К.Чаговец, **Г.А.Шешин** // «XXXIII совещание по физике низких температур», НТ-33, Екатеринбург, Россия, 2003, С.80-81.
31. Onset of convection in superfluid ^3He - ^4He mixture heated from below / E.Rudavskii, V.Chagovets, T.Kalko, A.Zadorozhko, **G.Sheshin** //Abstracts of Int. Symp.»Quantum Fluids and Solids. QFS 2003», New Mexiko, 2003, P.016.
32. Transport properties in the superfluid ^3He - ^4He mixtures./ V.Chagovets, A.A.Zadorozhko, T.V.Kalko, E.Rudavskii, **G.Sheshin** //Abstracts of 2nd Int. Conf. «Physics of liquid matter: Modern problems», Kyiv, 2003, p.156.
33. Instability of superfluid ^3He - ^4He solutions under heating from below / T.Kal'ko, E.Rudavskii, V.Chagovets, **G. Sheshin**, A.Zadorozhko //«20th General Conference Condensed Matter Division EPS. Prague, Book of Abstr., 2004, P.148
34. The influence of phase separation on convective stability of superfluid ^3He - ^4He mixtures /A. A. Zadorozhko, T. V. Kalko, V. K. Chagovets, E. Rudavskii, **G. Sheshin** //Abstracts of 3rd Int. Conf. »Physics of liquid matter: Modern problems », Kyiv 2005, P.224.
35. Phase separation and nucleation in superfluid mixtures of ^3He - ^4He at presence of a heat flow/ V. Chagovets, A. Zadorozhko, T. Kalko, E. Rudavskii, **G. Sheshin** //Abstracts of Int. Symp.» Quantum Fluids and Solids. QFS 2006», Kyoto Abstr. 2006, P.5525.
36. Thermal instability of superfluid phase – separated ^3He - ^4He solution heated from below/ V. Chagovets, A. Zadorozhko, T. Kalko, E. Rudavskii, **G. Sheshin** // Abstracts of Int.Conf in Ukraine “Condensed Matter: Theory and Applications” 2007, P.138.
37. Анализ релаксационных процессов и вязкость фотон-ротонной системы He II / А. А. Задорожко, Э. Я. Рудавский, В. К. Чаговец, **Г. А. Шешин**, Ю. А.

- Киценко //XXXV Совещание по физике низких температур (НТ-35).— Черноголовка, Россия: 2009. С. 41–42.
38. Турбулентное течение в сверхтекучем растворе ^3He в ^4He / А. А. Задорожко, Э. Я. Рудаковский, В. К. Чаговец, **Г. А. Шешин** //XXXV Совещание по физике низких температур (НТ-35).— Черноголовка, Россия: 2009. С. 43.
 39. The frequency dependences of the Critical velocity of the transition from laminar to turbulent flow superfluid ^4He / V. Chagovets, I. Gritsenko, E. Rudavskii, A. Zadorozhko, **G. Sheshin** //Abstracts Int. Conf. «Physics of liquid matter: Modern problems », Kyiv, 2010, P.332.
 40. On sound emission of quartz tuning forks in liquid helium (experiment)/ V. Chagovets, I. Gritsenko, E. Rudavskii, A. Zadorozhko, **G. Sheshin**, L. Skrbek, D. Schmoranzner, M. La Mantia //Abstracts Int. Symposium on Quantum Fluid and Solid 2010, Grenoble, France, P.50.
 41. Acoustic Radiation Modes of Quartz Tuning Fork in the Ballistic Regime of the Scattering of Thermal Excitations / I. Gritsenko, V. Chagovets, A. Zadorozhko, **G. Sheshin** //“The 26th international conference on temperature physics“, 2011, Beijin, China, P.184.
 42. Transition to turbulence regime in ^3He – ^4He solutions. Critical velocity / I. Gritsenko, A. Zadorozhko, E. Rudavskii, V. Chagovets, **G. Sheshin** //Abstracts Int. Symposium on Quantum Fluid and Solid 2012, Lancaster, UK, P.1.22.
 43. Transition to turbulence regime ^3He – ^4He solutions: ^3He condensation on quantized vortices / I. Gritsenko, **G. Sheshin** //9th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals, Odessa, Ukraine, 2012, P.26.
 44. The influence of acoustic emission on the onset of turbulent flow in He II / R. Nikonkov, I. Gritsenko, **G. Sheshin** //Abstracts Int. Symposium on Quantum Fluid and Solid 2013, Matsue, Japan, PS1.22, P.32.
 45. Influence of acoustic emission on the critical velocity of turbulence in superfluid helium / I.A. Gritsenko, **G. Sheshin** //Abstracts 6th Int. Conf. «Physics of liquid matter: Modern problems », Kyiv, Ukraine, 1-4. 2014, P.21.
 46. Коэффициент сопротивления колеблющегося кварцевого камертона погруженного в сверхтекучий гелий / И. А. Гриценко, К.А. Клокал, **Г.А. Шешин** //XXXVII Совещание по физике низких температур (НТ-37), Казань, Россия, стр. 2015, С.265-266.
 47. Flow of superfluid helium at high Reynolds number / I. Gritsenko, K. Klokot, S. Sokolov, **G. Sheshin** //Abstracts 7th Int. Conf. «Physics of liquid matter: Modern problems », Kyiv, Ukraine, 2016, P.49.

АНОТАЦІЯ

Шешин Г. О. Кінетичні та динамічні ефекти у надплинному гелії та його ізотопічних розчинах в умовах неоднорідності температури та тиску. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.09 – фізика низьких температур. – Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, Харків, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено експериментальному дослідженню кінетичних властивостей надплинного гелію і слабого розчину ^3He в ^4He при наднизьких температурах. Показано, що під дією градієнтів температури і концентрації у надплинному розчині ^3He - ^4He спостерігається гетерогенне зародкоутворення на квантованих вихрах концентрованої фази ^3He . Встановлено, що в подальшому відбувається розшарування фаз та поява міжфазної межі, в результаті нестійкості якої виникає конвекційна турбулентність розчину. Досліджено рухливість міжфазної межі в умовах градієнта тиску та виявлено, що при $T < 0,1\text{ K}$ температурна залежність коефіцієнта рухливості межі є функцією, обернено пропорційною квадрату температури. Досліджено перехід від ламінарної до турбулентної течії в He II та розчинах ^3He - ^4He . Виявлено, що в He II при $T < 1\text{ K}$ з'являється проміжний режим надплинної течії, який обумовлено розсіюванням теплових збуджень на квантованих вихрах. Виявлено, що додавання домішки ^3He призводить до істотного збільшення критичної швидкості переходу до турбулентної течії. Досліджено вплив сил Ван-дер-Ваальса на температуру надплинного переходу в атомних плівках ^4He , адсорбованого на графойлі. Виявлено, що нанесення проміжних атомних шарів дейтероводню на графойл призводить до збільшення температури надплинного переходу.

Ключові слова: надплинний гелій, ламінарна течія, конвекційна турбулентність, дисипація енергії, критична швидкість течії, розшаровані розчини ^3He - ^4He , двовимірна надплинність.

АННОТАЦИЯ

Шешин Г. А. Кинетические и динамические эффекты в сверхтекучем гелии и его изотопических растворах в условиях неоднородности температуры и давления. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.09 – физика низких температур. – Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Харьков, 2017.

Диссертационная работа посвящена исследованиям кинетических свойств сверхтекучего гелия и слабого раствора ^3He в ^4He . Для этого использованы прецизионные методики акустических измерений, метод кварцевого камертона и метод измерения теплопроводности и термодиффузии. Идентифицированы различные диссипативные процессы, обусловленные рассеиваниями тепловых возмущений в области температур гидродинамического вязкого трения и баллистического рассеяния. Данные методы исследования позволяли создавать условия для появления и развития неоднородных и неравновесных потоков гелия при сверхнизких температурах. Впервые исследованы условия развития конвективных течений, возбуждаемых с помощью теплового потока, направленного вверх, в расслоившемся растворе с концентрацией 9,5 и 9,8 % ^3He при температурах от 2 K до 0,1 K. Рост градиента температуры приводит вначале к пересыщению раствора, затем к гетерогенному зародышеобразованию и далее – образованию двух фаз расслоившегося

раствора. Появление границы расслоения инициирует термокапиллярную неустойчивость, наблюдаемую в эксперименте. Изучена подвижность межфазной границы расслоившихся растворов. Показано, что подвижность границы начинает увеличиваться при $T < 0,1$ К и зависит от температуры как T^2 . При 10 мК величина коэффициента роста границы на четыре порядка больше теоретических предсказаний. С помощью метода колеблющегося кварцевого камертона проведены исследования появления и развития турбулентности в ^4He в области температур от 4,2 до 0,1 К. Обнаружено, что при высоких температурах ($T > 1$ К), когда плотность нормальной компоненты велика, характер перехода от ламинарного к турбулентному течению такой же, как и в обычных жидкостях или газах. При турбулентном режиме течения зависимость возбуждающей силы (F) от скорости колебаний камертона (v) квадратичная, и сам переход происходит при числах Рейнольдса больше единицы. При $T < 1$ К после перехода к турбулентному течению наблюдается дополнительный промежуточный режим течения, характеризующийся зависимостью $F \sim v^3$. Такая зависимость обусловлена взаимным трением – рассеиванием тепловых возбуждений на квантованных вихрях. В этом случае переход от ламинарного к турбулентному течению происходит при числах Рейнольдса $\ll 1$. Для изучения влияния нормальной компоненты на рождение и развитие турбулентного течения были проведены измерения критической скорости перехода в 5 % растворе ^3He в ^4He . Обнаружено, что примесь ^3He , относящаяся к нормальной компоненте, существенно увеличивает критическую скорость перехода. Также обнаружено, что атомы ^3He при $T < 0,9$ К адсорбируются на квантованных вихрях, а дополнительным условием адсорбции ^3He на квантованных вихрях является скорость колебаний камертона, она по величине должна превышать критическую скорость колебаний в чистом гелии. Исследовано влияние сил Ван-дер-Ваальса на температуру сверхтекучего перехода в двумерных пленках ^4He на графойле с дополнительными двумя (тремя) атомными слоями дейтериевого водорода. Показано, что увеличение количества дополнительных слоев дейтериевого водорода приводит к повышению температуры сверхтекучего перехода в пленках ^4He . Кроме того, во втором слое ^4He с двумя дополнительными слоями HD наблюдалась двумерная конденсация ^4He .

Ключевые слова: сверхтекучий гелий, ламинарное течение, конвективная турбулентность, диссипация энергии, критическая скорость течения, расслоившийся раствор ^3He - ^4He , двумерная сверхтекучесть.

ABSTRACT

Sheshin G.A. The kinetic and dynamic effects in superfluid helium and its isotope solutions under the conditions of temperature and pressure inhomogeneities. – Manuscript.

Thesis for a doctor's degree in physics and mathematics by specialty 01.04.09 – low temperature physics. – B. I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of NAS of Ukraine, Kharkov, 2017.

The thesis presents the results of the kinetic properties study of superfluid helium and weak solution of ^3He in ^4He at ultralow temperature. It was shown that under the influence of temperature and concentration gradients in superfluid solution ^3He - ^4He the heterogeneous nucleation is observed on quantized vortices of the concentrated phase of ^3He . It was found that, after the phase separation, the instability of the interphase boundary results in the appearance and development of the convection turbulence in a solution. The mobility of the interphase boundary in presence of the pressure gradient was investigated. It is found that at temperature above the range $T < 0,1 \text{ K}$ the dependence of the phase boundary mobility on temperature is a function inversely proportional to the squared temperature. The transition from laminar to turbulent flow in He II and ^3He - ^4He solutions is studied. It was found that in He II at $T < 1 \text{ K}$ an intermediate flow regime is realized due to the scattering of thermal excitations by quantized vortices. It is also found that the addition of ^3He impurities leads to an essential increase of the critical velocity of transition to turbulent flow. The influence of the van der Waals forces on the superfluid transition temperature is studied in atomic ^4He films adsorbed on grafoil. It is found that the prior application of additional atomic layers of hydrogen deuterium on grafoil, increases the superfluid transition temperature.

Key words: superfluid helium, laminar flow, convection turbulence, energy dissipation, turbulent flow, separated ^3He - ^4He mixtures, two-dimensional superfluidity.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1.9. Тир. 150 прим. Зам. 205-17.
Підписано до друку 25.04.17. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.