

ГРИЦЕНКО Іван Анатолійович



УДК 538.941

**РЕЖИМИ ЛАМІНАРНОЇ ТА ТУРБУЛЕНТНОЇ ТЕЧІЇ ГЕЛЮ ТА
ЙОГО ІЗОТОПІЧНОГО РОЗЧИНУ ПРИ НАДНИЗЬКИХ
ТЕМПЕРАТУРАХ**

01.04.09 – фізика низьких температур

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Шешин Григорій Олександрович,
Фізико-технічний інститут низьких температур
ім. Б.І. Веркіна НАН України,
старший науковий співробітник відділу
квантових рідин та кристалів.

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;

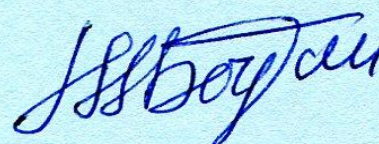
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Полуектов Юрій Матвійович,
Національний науковий центр
«Харківський фізико-технічний інститут»
НАН України, завідувач відділу дифузійних
та електронних явищ у твердих тілах.

Захист відбудеться « 11 » жовтня 2016 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 « 8 » вересня 2016 року.

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

 Богдан М. М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з невирішених проблем сучасної фізики залишається питання щодо механізмів утворення вихорів при течії рідин та газів. В останнє десятиріччя зростає інтерес до вивчення турбулентності в надплинних системах. Подібність характеристик класичної та квантової турбулентності дозволяє говорити про універсальність цього явища.

Дослідження течії чистого рідкого гелію та його ізотопічних розчинів проводилися різноманітними методами. З використанням занурених в гелій осцилюючих тіл, таких як сіточки або сфери, стало можливим проведення досліджень течії квантових рідин при температурах нижчих за 1 К. Однак такі осцилюючі тіла мають істотні недоліки: низьку добротність, необхідність створення магнітного поля тощо. Тому останнім часом особливе значення має нова чутлива методика на основі осцилюючого кварцового камертона. Це дозволило отримати достовірні результати вимірювань в'язкості чистого ^4He та продемонструвало можливість використання камертона в ролі датчика температури та тиску в нормальному гелії.

Зменшення температури нижче критичної величини T_λ приводить до зростання надплинної частки гелію. За таких температур при ламінарній течії гелію спостерігається зміна режимів: з гідродинамічного, в якому головним механізмом дисипації енергії є в'язке тертя, на балістичний режим, при якому дисипація відбувається за рахунок розсіювання теплових збуджень на осцилюючому тілі. В цьому випадку проявляються дисипативні процеси, які відмінні від таких, що мають місце у класичній в'язкій рідині, і які не вивчені в повній мірі для занурених в надплинний гелій осцилюючих тіл. При експериментальному дослідженні течії надплинного гелію залишається важливим питання відокремлення властивостей потоку надплинної рідини від фізичних властивостей використаного приладу.

Можливість формування розчину атомів ^3He у рідкому ^4He дозволяє спостерігати унікальний клас конденсованих речовин – ізотопічних розчинів. Додавання домішок ^3He до чистого ^4He призводить до зсуву переходу в надплинний стан рідкого розчину в бік нижчих температур, що може впливати на перехід до турбулентної течії. Це питання залишалося не вивченим для розчинів ^3He - ^4He з високою концентрацією домішок ^3He .

Наявність перерахованих невирішених питань робить важливим проведення систематичних експериментальних досліджень як механізмів дисипації енергії в нормальному та надплинному гелії, так і впливу тиску, температури та домішок ^3He на перехід від ламінарної до турбулентної течії. 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 рамках тематичного плану інституту відповідно до відомчих тем: «Нові ефекти в квантових рідинах та кристалах при низьких та

наднизьких температурах» (номер державної реєстрації 0106U002557, термін виконання 2006 – 2010 рр.) та «Об'ємні та поверхневі наносистеми в квантових рідинах та 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 експериментальне виявлення особливостей процесів дисипації енергії в нормальному та надплинному гелії при переході від ламінарної до турбулентної течії рідкого гелію та вплив на такі процеси домішок ^3He та джерела монохроматичного випромінювання (осцилюючого кварцового камертону) при наднизьких температурах.

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

- дослідити температурну залежність коефіцієнта опору потоку в рідкому ^4He при ламінарній течії та визначити вплив температури та тиску на коефіцієнт опору при низьких температурах;
- визначити умови виникнення резонансу та провести пряму реєстрацію можливого випромінювання звуку в гелії під дією монохроматичного випромінювача при наднизьких температурах;
- дослідити вплив тиску та температури на величину критичної швидкості переходу від ламінарної до турбулентної течії в чистому ^4He ;
- визначити вплив на температурну залежність критичної швидкості переходу до турбулентної течії домішок атомів ^3He при додаванні їх до чистого ^4He .

Об'єктом дослідження: кінетичні процеси в квантових рідинах при наднизьких температурах.

Предметом дослідження дисертаційної роботи є механізми дисипації енергії при ламінарному режимі течії чистого гелію та особливості переходу між ламінарною та турбулентною течією в чистому ^4He та концентрованому розчині ^3He - ^4He .

Методи дослідження. Для дослідження кінетичних процесів в рідкому гелії були використані наступні методики: низькочастотна резонансна методика для реєстрації акустичних хвиль джерела монохроматичного випромінювання; методика осцилюючого кварцового камертона; методика обробки отриманих амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) у всьому температурному діапазоні з використання апроксимації за кривою Лоренца.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше експериментально знайдено температурну залежність коефіцієнта дисипації енергії в надплинному гелії при ламінарній течії при переході від гідродинамічного до балістичного режиму та запропоновано емпіричну залежність, яка описує температурну поведінку коефіцієнта питомої дисипації.
2. Вперше спостережено анізотропне акустичне випромінювання від зануреного у надплинний гелій осцилюючого кварцового камертона та описано цей

процес за допомогою моделі квадрупольного випромінювача. Виявлено, що при температурах нижчих за 0,7 К величина критичної швидкості переходу до турбулентної течії пов'язана з балістичним розсіюванням теплових збуджень.

3. Вперше встановлено, що потужність джерела монохроматичного сигналу впливає на величину критичної швидкості переходу до турбулентної течії. Знайдено, що при потужностях вищих за 10 нановат критична швидкість пропорційна кореню третього ступеня з потужності сигналу, а при менших потужностях величина критичної швидкості не змінюється.
4. Вперше показано, що в надплинному розчині гелію з домішками ^3He при переході від ламінарної до турбулентної течії відбувається зростання критичної швидкості переходу в порівнянні з чистим ^4He .

Практичне значення отриманих результатів. Отримані в роботі результати носять фундаментальних характер і поширюють уявлення про природу такого явища, як турбулентність у квантових рідинах. Проведені дослідження дозволяють проводити аналогії щодо механізмів дисипації енергії в класичних та квантових рідинах в режимі ламінарної течії. Експериментально отримані результати щодо умов генерації звуку у гелії осцилюючим кварцовим камертоном дозволяють покращити методику дослідження ламінарної та турбулентної течії квантових рідин з використанням джерел монохроматичного випромінювання. Дані про вплив домішок ізотопу гелію на величину критичної швидкості при переході до турбулентної течії дозволяють створювати нові експериментальні системи для дослідження механізмів такого переходу в класичних середовищах з різною в'язкістю. Запропоновані в роботі оригінальні елементи методики автоматизації експерименту можуть бути використані при дослідженнях кінетичних явищ в рідких та газових середовищах при низьких і наднизьких температурах.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, узагальнені в дисертаційній роботі, отримані в співавторстві за безпосередньої участі автора. Дисертант приймав активну участь на всіх етапах наукового дослідження, а саме: у постановці завдання, підготовці експериментального обладнання та проведенні досліджень при низьких та наднизьких температурах, інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків і написанні статей. Автором особисто знайдено величину швидкості переходу від ламінарної до турбулентної течії в концентрованому ізотопічному розчині гелію. Дисертантом самостійно встановлено величину коефіцієнта питомого опору, який характеризує рівень дисипації енергії в гелії при наднизьких температурах. Здобувачем виявлено вплив тиску та температури на величину дисипативних втрат джерела монохроматичного випромінювання в надплинному гелії. Дисертантом особисто встановлено взаємозв'язок між потужністю акустичного випромінювання камертоном та його частотою, а також проведено пряму реєстрацію акустичного випромінювання в чистому гелії при низькій температурі. Таким чином, особистий внесок автора є визначальним.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертації результати досліджень були представлені на таких міжнародних та вітчизняних конференціях:

- Всеукраїнська конференція молодих вчених „Фізика низьких температур”, 1-5 червня, 2009, Харків, Україна;
- International Conference “Physics of liquid matter: Modern problems”, May 28-31, 2010, Kyiv, Ukraine;
- International Conference for Young Scientists “Low temperature physics”, June 7-11, 2010, Kharkiv, Ukraine;
- International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS 2010), August 1-7, 2010, Grenoble, France;
- II International Conference for Young Scientists “Low temperature physics”, June 6-10, 2011, Kharkiv, Ukraine;
- New frontiers of low temperature physics (ULT 2011), August 19-22, 2011, Daejeon, South Korea;
- International Conference on Low Temperature Physics (LT 27), August 10-17, 2011, Beijing, China;
- III International Conference for Young Scientists “Low temperature physics”, May 14-18, 2012, Kharkiv, Ukraine;
- International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS 2012), August 15-21, 2012, Lancaster, United Kingdom;
- IX International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals, September 2-8, 2012, Odessa, Ukraine;
- Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА, 15-17 травня, 2013, Львів, Україна;
- International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS 2013), August 1-6, 2013, Matsue, Japan;
- XXVIII Research Workshop “Nucleation theory and applications”, April 12-20, 2014, Dubna, Russia;
- VI International Conference “Physics of liquid matter: Modern problems”, May 23-27, 2014, Kyiv, Ukraine;
- V International Conference for Young Scientists “Low temperature physics”, June 2-6, 2014, Kharkiv, Ukraine;
- XXVII International Conference on Low Temperature Physics (LT 27), August 6-13, 2014, Buenos Aires, Argentina;

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 6 статтях у провідних фахових наукових виданнях [1–6], і в 16 тезах доповідей наукових конференцій [7–23].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний об’єм роботи складає 138 сторінок. Вона містить 54 рисунків, 1 таблицю та список використаних джерел з 146 найменувань на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** викладено загальну характеристику роботи, сформульовано мету, основні завдання та прикладне значення проведених досліджень, перераховано об'єкти та методи досліджень. Крім того, обґрунтовано актуальність обраної тематики, наукову новизну і практичне значення. Наведено дані про особистий внесок дисертанта, подані відомості про апробацію роботи та наукові публікації. Описано структуру дисертаційної роботи.

Перший розділ «Турбулентність в ^4He та розчинах ^3He - ^4He (огляд)» містить огляд літератури за темою дисертації. В розділі розглянуто відомості про проведені раніше дослідження в'язкості гелію і результати виміру швидкості поширення першого та другого звуків в гелії. Ці дані необхідні для розрахунку дисипації енергії в гелії. Макроскопічна течія ^4He супроводжується процесами дисипації в ламінарному та турбулентному режимах течії. При $T > 0,7\text{ K}$ основний внесок в розсіювання енергії вносить в'язке тертя нормальної компоненти рідини та осцилюючого тіла. У випадку, коли довжина вільного пробігу теплових збуджень He II перевищує розміри тіла, дисипація пов'язана з балістичним розсіюванням теплових збуджень, тому розділ містить температурну залежність в'язкості гелію та умови спостереження гідродинамічного та балістичного режимів розсіювання в надплинному гелії. Додатковий механізм дисипації енергії в гелії, який відіграє важливу роль при дисипації енергії осцилюючим тілом в надплинному гелії, може бути пов'язаний з виникненням акустичного випромінювання, тому в розділі приведені дані з температурної залежності поширення звуку в ^4He . Також приведені результати робіт по створенню та вивченню течії рідкого гелію та його ізотопічних розчинів за допомогою різноманітних осцилюючих тіл. Окремо виділені результати, отримані за допомогою методики осцилюючого кварцового камертона, яка має важливі переваги: високу надійність та добротність, легкість використання та нечутливість до зовнішніх магнітних полів. Описана можливість використання такої методики як для дослідження переходу від ламінарної до турбулентної течії в гелії від $4,2\text{ K}$ до наднизьких температур, так і для вивчення течії надплинних ізотопічних розчинів квантових рідин.

У **другому розділі** «Експериментальна база та методика досліджень» міститься детальний опис експериментального устаткування для вивчення течії надплинного гелію. Описано принцип роботи осцилюючого кварцового камертона та їх характеристики, а також використаної резонансної методики. Наведено характеристики устаткування, що використано при виконанні досліджень, яке дозволяє проводити унікальні дослідження течії гелію у широкому інтервалі температур від $4,2\text{ K}$ до $0,012\text{ K}$ і інтервалі тисків від $24,8\text{ атм}$ до тиску насиченої пари. Для отримання низьких температур використовувався розроблений та виготовлений у відділі квантових рідин і

кристалів рефрижератор розчинення із зовнішнім циклом циркуляції ^3He , який є частиною комплексу для фізичних досліджень при наднизьких температурах ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна і є частиною об'єкту Національного надбання України.

Описано вимірювальні комірки, які складаються з трьох частин: верхнього фланцю з теплообмінником, нижнього фланцю з вакуумним електричним роз'ємом та середньої частини з закріпленими камертонами та можливістю встановлення п'єзодатчиків для реєстрації хвиль першого звуку.

При проведенні досліджень спочатку проводились вимірювання амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) для кожного камертона в вакуумі для визначення п'єзоелектричної постійної. Потім в комірку конденсувався гелій і проводились вимірювання при низьких температурах. Для досліджень використовується гелій технічної чистоти. При дослідженнях розчину $^3\text{He} - ^3\text{He}$, спочатку проводились вимірювання АЧХ в вакуумі при низькій температурі для визначення п'єзоелектричної постійної, потім проводились калібрувальні вимірювання в чистому ^4He . В подальшому комірка відігрівалася до кімнатної температури, гелій відкачувався, знову проводилось охолодження комірки до низької температури та конденсація досліджуваного розчину $^3\text{He} - ^4\text{He}$. Тиск в комірці створювався за допомогою газифікатора, розташованого в лінії капіляра заповнення комірки.

Реєстрація температури здійснювалась за допомогою термометрів опору RuO_2 , прокаліброваних за допомогою термометра по кривій плавлення ^3He . Точність вимірювання температури була на рівні $\pm 0,001 \text{ K}$. Для підтримки температури на потрібному рівні використовувався автоматичний стабілізатор температури.

У **третьому розділі** «Дисипація енергії кварцовим камертоном, що коливається, при ламінарній течії» містяться оригінальні експериментальні результати щодо універсальної температурної залежності коефіцієнта питомого опору для різних осцилюючих тіл в He II в широкій області температур, узагальнених результатів про вплив температури, тиску, резонансної частоти коливання камертона на дисипацію енергії.

Розділ містить результати вперше проведеної реєстрації акустичного випромінювання камертона за допомогою датчиків звуку надплинному гелію.

Представлена на рис. 1 температурна залежність коефіцієнта питомого опору дозволяє проводити порівняння дисипації енергії осцилюючих тіл різної форми та розміру: кварцових камертонів ($\blacktriangle, \blacktriangledown$), осцилюючої сфери ($\circ$), дротинки ($\diamond$).

При температурах вище за $0,9 \text{ K}$ в гідродинамічному режимі результати для всіх камертонів співпали. Залежності коефіцієнта питомого опору A/S від температури для сфери та дротинки якісно співпали, але кількісно відрізняються від камертонів приблизно в 5 разів. При зниженні температури створюються умови, коли глибина проникнення в'язкої хвилі дорівнює характерному розміру осцилюючого тіла і течія стає квазістаціонарною. У цьому випадку коефіцієнт дисипації зростає при зниженні температури, як

видно у випадку сфери та дротинки при переході від гідродинамічного до балістичного режиму.

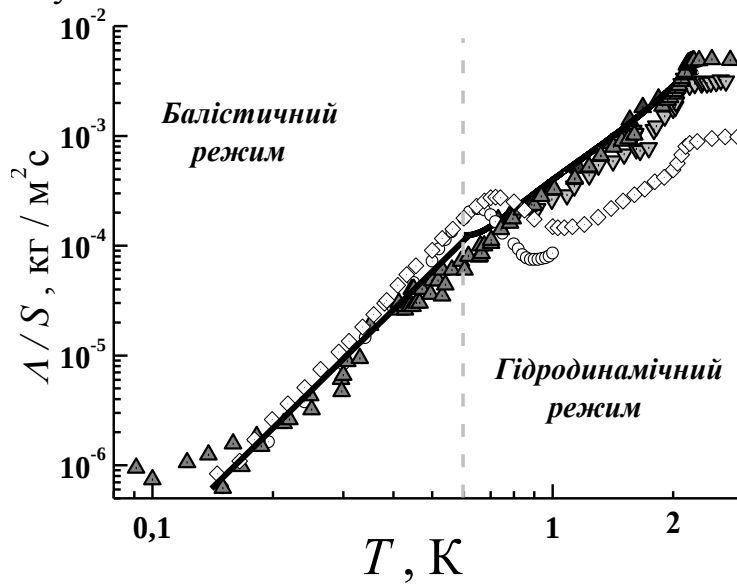


Рис. 1. Температурна залежність коефіцієнта питомого опору.

Відсутність мінімуму для камертонів на залежності Λ/S від T пов'язана з набагато більшою резонансною частотою коливань f_0 для камертонів (~ 32 кГц), порівняно зі сферою та дротинкою ($f_0 \leq 1$ кГц), тому перехід до квазістаціонарної течії повинен відбуватися при більш низьких температурах. Балістичний режим настає при $T < 0,7$, К і в такому режимі має значення не форма осцилюючого тіла, а площа поперечного перетину, перпендикулярна напрямку руху. Коефіцієнт опору при такому режимі залежить від щільності нормальної компоненти, яка має залежність $\rho_n(T) \sim T^4$. Для опису отриманих даних єдиною кривою була застосована інтерполяційна формула, справедлива в балістичному режимі при $T \rightarrow 0$ і гідродинамічному при $T \rightarrow T_\lambda$:

$$\Lambda/S = \left[\frac{1}{(\Lambda_i + \Lambda_s)/S} + \frac{1}{\Lambda_b/S} \right]^{-1}, \quad (1)$$

де Λ_i , Λ_s , Λ_b – відповідно коефіцієнти опору в гідродинамічному режимі для циліндра, сфери та балістичному режимі (Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, 1986). Ця залежність приведена на рис. 1 суцільною лінією. Для сфери (○) і циліндра (◇) нормування дає близькі значення в балістичному режимі. Видно, що використання наведеної формули дозволяє описати коефіцієнт питомого опору у всій області температур. Опис температурної залежності коефіцієнта опору вище 1,9 К з допомогою кінетичної теорії не представляється можливим. Наявність мінімуму, як у випадку сфери та циліндру, залежить від частоти коливання тіла та його розмірів. Зростання одного з цих параметрів призводить до зміщення мінімуму в область низьких температур. Наявність максимуму свідчить про перехід від гідродинамічного до балістичного режиму. Відсутність будь-яких екстремумів на температурній залежності коефіцієнта питомого опору для кварцового камертона пов'язано з високою частотою коливань і відсутністю впливу квазістаціонарної течії.

Ширина резонансної лінії визначається дисипацією енергії в системі. Тому були виміряні температурні залежності ширини резонансу для різних камертонів з частотою резонансу 32 кГц, які дозволили спостерігати зміну механізмів дисипації (рис. 2). При $T > 1$ К для розглянутих камертонів виміряні значення Δf збігаються за величиною, при цьому домінує дисипація за рахунок в'язкого тертя нормальної компоненти гелію (гідродинамічний режим розсіювання). Для групи точок 1 при зниженні температури ширина резонансу зменшується, а при $T < 0,6$ К домінує балістичне розсіювання теплових збуджень Не II на ніжках осцилюючого камертона. При $T < 0,25$ К ширина резонансної кривої стає порівняною з вимірюваною шириною в вакуумі. Для точок груп 2 і 3 при $T < 0,8$ К ширина резонансу не залежить від температури і перевищує виміряне значення у вакуумі, що може бути пов'язано з появою додаткового механізму дисипації енергії при коливанні камертона, наприклад, зі збудженням хвилі звуку.

При визначенні внеску акустичного випромінювання було зроблено припущення, що камертон є лінійним квадрупольним випромінювачем звуку. У такому випадку потужність, необхідна для збудження хвилі отримана в наближенні, коли довжина хвилі звуку λ більше характерного розміру камертона. До такої умові найбільше наближені експериментальні точки груп 2 і 3. Пунктирна лінія відповідає дисипації за рахунок випромінювання камертоном звукової хвилі за формулою:

$$\Delta f_{\text{акуст}} = 190 \cdot C_{3D} \frac{(H+D)^2 \rho}{\rho_q c^5} f_0^6 m_q \left(\frac{f_0}{f_{\text{vac}}} \right), \quad (2)$$

де C_{3D} – підгінний коефіцієнт, H і D – ширина ніжки камертона та відстань між ніжками камертона, ρ_q – щільність кварцу, c – швидкість розповсюдження першого звуку, ρ – щільність навколишнього середовища, m_q – маса ніжки камертону, f_0 та f_{vac} – резонансні частоти камертона в гелії та вакуумі, відповідно. Оскільки геометричні розміри камертонів і його резонансні частоти коливань постійні, а при температурах нижче 1 К швидкість звуку c практично не залежить від температури, то і величина дисипації не залежить від температури, що і спостерігається. Приведені результати дозволяють зробити висновок, що за умов резонансу (групи точок 2 та 3) механізм дисипації за

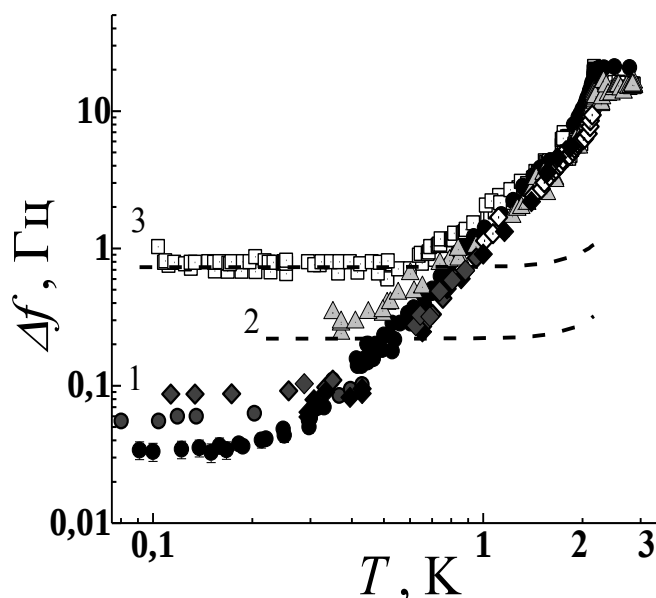


Рис. 2. Температурні залежності напівширини АЧХ камертонів в гелії при наявності різних дисипативних процесів.

рахунок в'язкого тертя змінюється механізмом при якому втрати енергії пов'язані зі збудженням хвилі першого звуку. Цей механізм домінує при низьких температурах.

Розрахунок ширини резонансу при частотах коливань 99 кГц та 32 кГц приведений на рис. 3 при відсутності акустичного випромінювання і його наявності здійснювався за формулою з роботи (D. Schmoranz et al., 2011). При розрахунку враховувались залежності швидкості звуку c , і щільності ρ ^4He від тиску. У разі відсутності випромінювання $C_{3D} = 0,02$, а при його наявності у відкритих камертонах $C_{3D} = 0,4$. Величина C_{3D} пропорційна ефективності акустичного випромінювання в системі.

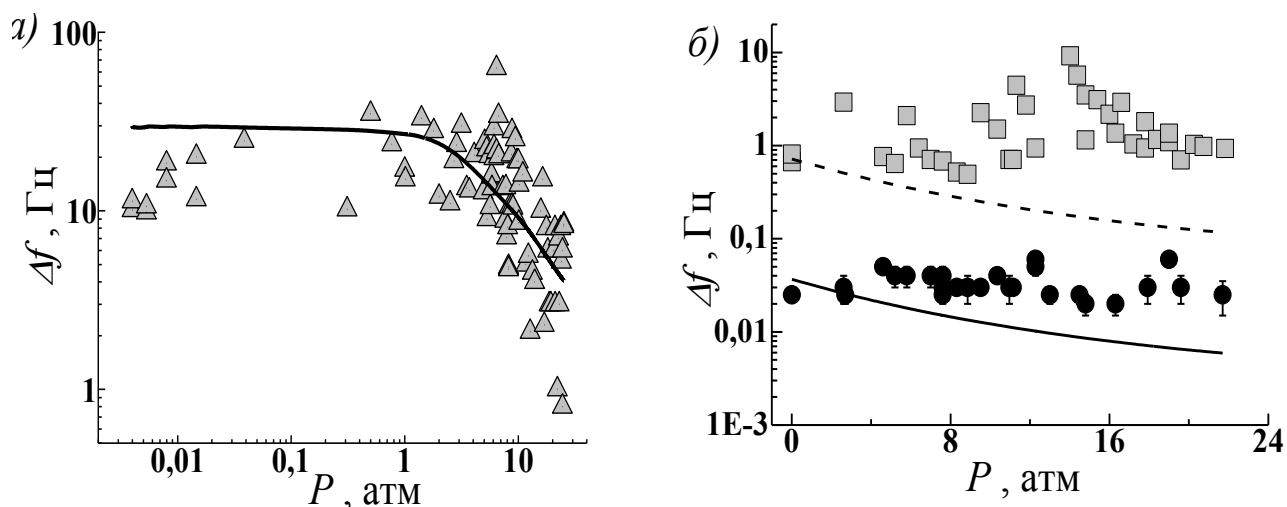


Рис. 3. Вплив тиску на ширину резонансу для камертонів з частотами 99 кГц (а) та 32 кГц (б). Лінії – розрахунок за формулою (2).

Для частоти коливань 99 кГц залежність Δf від тиску якісно і кількісно узгоджується з розрахунком, незважаючи на досить великий розкид даних (суцільна лінія на рис. 3а). Для камертонів з частотою 32 кГц (рис. 3б) узгодження спостерігається при низьких тисках. При максимальному тиску розрахунок і експериментальні дані відрізняються більш ніж у 5 разів. На відміну від випадку відсутності акустичного випромінювання (●), при присутності акустичного випромінювання (□, ▲) спостерігається розкид даних, що може бути пов'язано з перевідбиттям звукової хвилі від стінок комірки та зміною ширини резонансу.

Для аналізу всіх отриманих експериментальних даних для камертонів з різною резонансною частотою і при підвищених тисках було перейдено від швидкості звуку до довжини звукової хвилі λ , для цього формулу 2 розділили на f_0 . Це призвело до того, що отримана величина зворотної добротності $1/Q$ пропорційна λ^{-5} . Залежність $1/Q$ від довжини акустичної хвилі для всіх камертонів з різними резонансними частотами була виміряна при тисках від 10^{-3} атм до 24,9 атм (рис. 4).

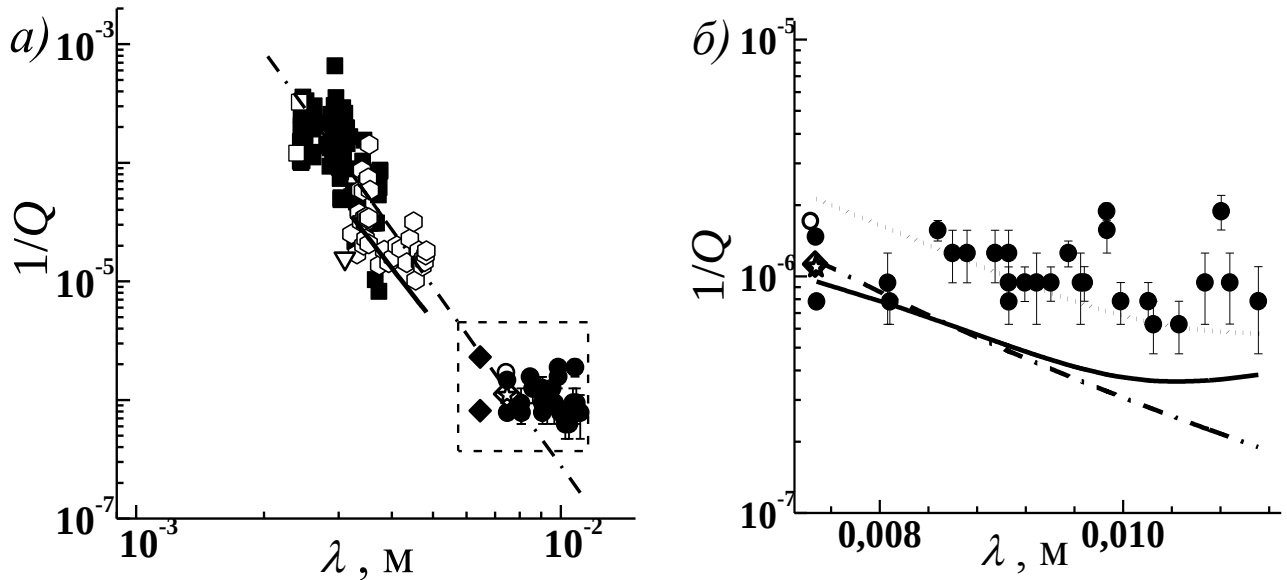


Рис. 4. Залежність зворотної добротності від довжини хвилі акустичного випромінювання для камертонів з різними частотами при $0,37\text{ K}$. Суцільна лінія – розрахунок для камертонів з $f_0 = 77\text{ кГц}$, штрих-пунктир – розрахунок за формулою (2) при $f_0 = 32\text{ кГц}$.

Лінії відповідають розрахункам внеску акустичного випромінювання. Суцільна лінія – розрахунок для камертона з частотою 77 кГц , розмір якого менший за інші камертони, тому суцільна лінія знаходиться нижче. На рис. 4б зображені дані для камертонів з f_0 , близькими до 32 кГц . Суцільна лінія – розрахунок для випадку балістичного розсіювання теплових збуджень на ніжках камертона. На відміну від температурної залежності, в розрахунку враховувалася залежність швидкості звуку і щільності гелію від тиску при постійній температурі (J. Brook, 1977). Лінія з точок відповідає сумі механізмів дисипації: акустичного випромінювання і розсіювання теплових збуджень. Для камертонів з частотами порядку 32 кГц (●) видно, що при малих довжинах звукової хвилі (низькі тиски) внесок балістичного розсіювання теплових збуджень і акустичного випромінювання практично співпадають при $\lambda \sim 7,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$. При великих довжинах хвиль механізм балістичного розсіювання домінує над механізмом акустичного випромінювання.

Виявлення внеску акустичного випромінювання камертоном в гелії проводилося при $T = 0,36\text{ K}$ в ^4He . Для реєстрації звукового випромінювання використовувалися кварцові камертони з $f_0 \sim 32\text{ кГц}$ та п'єзоелектричні датчики з $f_0 \sim 4,6\text{ МГц}$. Напрямок коливань одного з камертонів був паралельний площині звукового датчика (○), іншого камертона – перпендикулярний (●). Величина сигналу у вакуумі (■, □) (електричні наведення) для обох камертонів була набагато нижче, ніж рівень сигналу в надплинному гелії (●, ○) (рис. 5а).

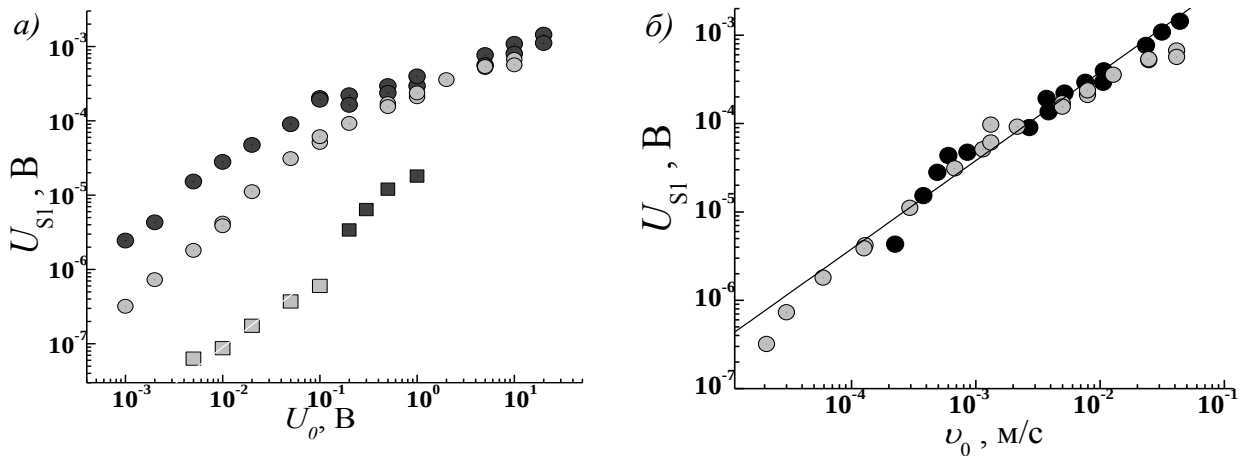


Рис. 5. Залежність величини сигналу, що прикладається до камертону (а), та перерахованої швидкості (б) від напруги.

Акустичне випромінювання для камертонів у двох випадках відрізняється приблизно у 7 разів, однак величина сигналу, що приймається звуковими датчиками була однаковою для обох камертонів. Така поведінка пов'язана з різною орієнтацією камертонів. Розбіжність у записі інтенсивності пояснюється наявністю акустичного випромінювання, в площині коливання камертона більшого, ніж очікується у перпендикулярному напрямку. Однаковий рівень зареєстрованого сигналу на залежності величини приймаючого сигналу від швидкості (рис. 5б) для двох випадків розташування камертонів відносно датчиків звуку підтверджує той факт, що величина вимірюваного сигналу пропорційна амплітуді швидкості, а не величині прикладеної напруги. Суцільна лінія на рисунку відповідає лінійній залежності.

Четвертий розділ «Перехід від ламінарної до турбулентної течії надплинного ${}^4\text{He}$ » присвячений вивченню впливу акустичного випромінювання, тиску та температури на критичну швидкість переходу між режимами течії в чистому ${}^4\text{He}$.

По виміряним АЧХ визначалася залежність швидкості коливання камертона v від збуджуючої сили F (рис. 6). Лінійна залежність $F \sim v$ (штрих-пунктирні лінії) спостерігається при малих силах. Зростання сили призводить до відхилення від лінійної залежності, при чому для точок (●) одразу маємо квадратичну залежність швидкості від сили (суцільна лінія), а для точок (○) існує проміжний режим течії (пунктирна лінія). В обох випадках на залежностях спостерігаються злами (стрілки), які відповідають критичним швидкостям v_c переходу до турбулентної течії. Криві відрізняються різними значеннями відношення R/λ (R – характерна відстань від камертона до стінки комірки, λ – довжина акустичної хвилі). При ламінарній течії найбільший вплив звукової хвилі за рахунок перевідбиття спостерігався за умови створення резонансу хвилі першого звуку в комірці. При $R/\lambda > 1/2$ (●) основним механізмом дисипації є акустичне випромінювання – реалізується умова акустичного резонансу.

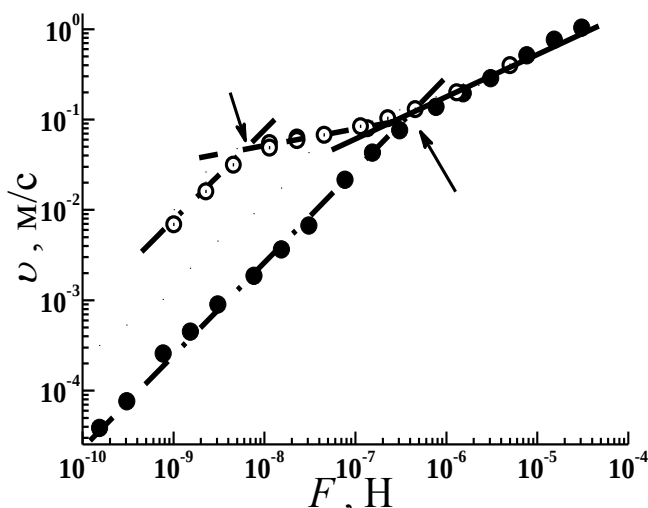


Рис.6. Вплив акустичного випромінювання на величину швидкості переходу до турбулентної течії в ^4He при 0,37 К.

умовах випромінювання хвилі звуку існує розкид даних, який пов'язаний з перевідбиттям звукової хвилі від стінок комірки. Розкид значень критичної швидкості при тиску менше ніж 5 атм зростає через створення умови резонансу.

При R/λ набагато менше ніж 1/2 (O) реалізується режим балістичного розсіювання теплових збуджень на ніжках осцилюючого камертона. Цей механізм майже не залежить від тиску.

На рис. 7а приведені результати з залежності критичної швидкості v_c від тиску в присутності акустичного випромінювання (▼) та без нього (○) при $T = 0,37$ К. При відсутності акустичного випромінювання v_c практично не залежить від тиску, у той же час в

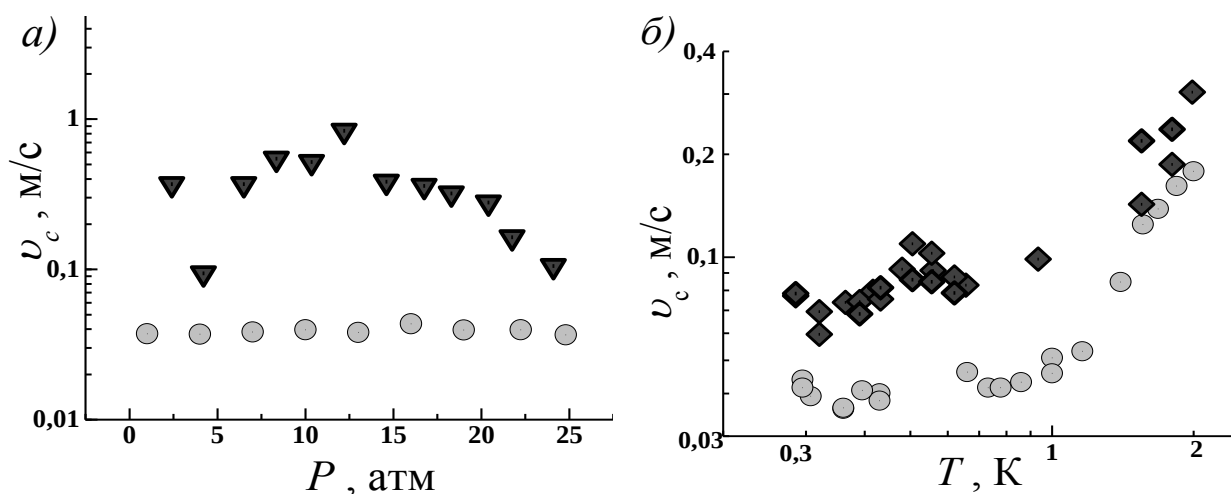


Рис. 7. Вплив тиску (а) та температури (б) на величину швидкості переходу до турбулентної течії з урахуванням акустичного випромінювання.

Результати вимірювання температурної залежності критичної швидкості в надплинному гелії при тиску насиченої пари при наявності акустичного випромінювання (◆) і без нього (○) зображені на рис. 7б. При $T > 1,2$ К результати вимірювань практично збігаються, що пов'язано з домінуючим впливом дисипації за рахунок в'язкості. При $T < 1,2$ К для точок (◆) зменшення критичної швидкості пов'язано з тим, що основним механізмом дисипації стає

акустичне випромінювання, а критична швидкість становиться більше, ніж без такого випромінювання, коли основним механізмом дисипації енергії виступають втрати за рахунок в'язкого тертя. При $T < 0,6$ К критична швидкість практично не залежить від температури для обох випадків. Однак, при відсутності акустичного випромінювання (○) відбувається зміна механізму дисипації кінетичної енергії осцилюючого камертона з в'язкого тертя на балістичний механізм розсіювання.

Результати вимірювань критичної швидкості переходу v_c від ламінарної до турбулентної течії для всіх камертонів від відповідної збуджуючої потужності W наведені в логарифмічному масштабі на рис. 8.

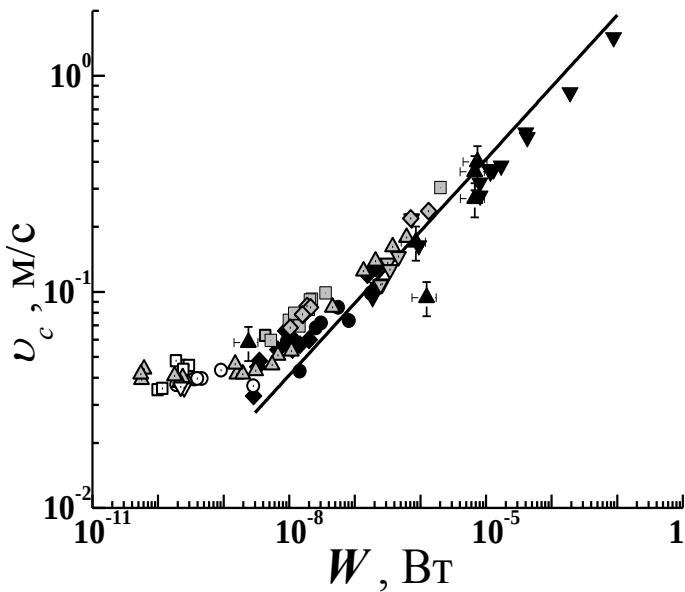


Рис. 8. Залежність критичної швидкості переходу до турбулентної течії від прикладеної до камертона потужності в гелії.

нановат, спостерігається помітне відхилення від цієї залежності, в такому випадку величина критичної швидкості практично перестає залежати від потужності, і спостерігається перехідний режим течії з швидким зростанням щільності квантованих вихорів. Таким чином, на величину критичної швидкості переходу до турбулентної течії впливають умови відсутності або присутності акустичного випромінювання у вигляді додаткових витрат енергії на збудження хвилі першого звуку.

У п'ятому розділі «Вплив домішок ^3He на критичну швидкість переходу до турбулентного режиму» розглядається перехід від ламінарної до турбулентної течії в ізотопічному розчині ^3He в ^4He з концентрацією домішок ^3He $x \sim 5\%$.

Символи ($\square$, ∇ , $\circ$) відповідають результатам у відсутності акустичного випромінювання, коли основним механізмом дисипації є балістичне розсіювання теплових збуджень на осцилюючому тілі при низьких температурах. При температурі 0,37 К для результатів вимірювань ($\blacklozenge$, $\blacktriangle$, $\blacksquare$, $\blacktriangledown$, $\bullet$) і різних тисках домінує акустичне випромінювання. Також приведені результати ($\triangle$, $\square$, $\diamond$, $\triangledown$) при тиску насиченого пару та різних температурах. При потужностях рівних або більших за 10 нановат отримані дані можливо описати єдиною залежністю (суцільна лінія). При потужностях менших за 10

Додавання домішок ^3He змінює вигляд АЧХ зі зниженням температури. При температурі 1,03 К АЧХ для розчину добре апроксимуються кривою Лоренца, зменшення температури приводить до появи зривів (○, ◆) (рис. 9).

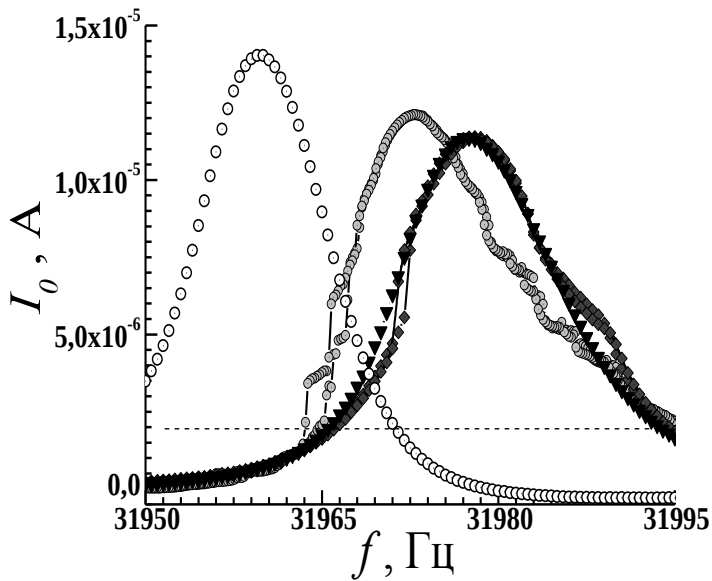


Рис. 9. АЧХ камертона в 5 % розчині при напрузі 20 В при температурах: 1,03 К (▼), 0,71 К (◆) и 0,35 К (○) та чистому ^4He (○).

Експериментальним даним для чистого ^4He при $T = 0,35$ К відповідають точки (○). Перші нерегулярності на резонансних залежностях для розчину починають проявлятися при температурі 0,71 К. Зниження температури призводить до збільшення кількості стрибків, причому характер стрибків з боку менших від резонансу частот і з боку більших частот відрізняється. Особливості на АЧХ для розчину відтворювались при подальших скануваннях. При перевищенні амплітуди сигналу величини $2 \cdot 10^{-6}$ А (пунктирна лінія) в надплинному гелії, відбувається перехід до турбулентної течії, при якій генеруються квантовані вихорі. Відомо, що домішки ^3He при низьких температурах адсорбуються на корі квантованого вихору (L.S. Reut, I.Z. Fisher, 1969), а при зростанні концентрації розчину адсорбція ^3He на корі вихору відбувається при більш високих температурах (R.M. Ostermeier, W.I. Glaberson, 1975). Порівнюючи літературні дані з власними дослідженнями можна зробити висновок, що для 5 % розчину адсорбція атомів ^3He на корі вихору настає при температурі нижче 0,9 К. Це добре видно по результатам, що отриманим при $T = 0,71$ К, коли спостерігалися перші стрибки. Таким чином поява зривів на АЧХ для камертонів в розчині, ймовірно пов'язана з адсорбцією атомів ^3He на корі вихору, а зниження температури веде до полегшення адсорбції, і нерегулярності починають з'являтися при менших амплітудах сигналу.

По зламу на вольт-амперній характеристиці була визначена температурна залежність величина критичної швидкості v_c (●) переходу до турбулентної течії в досліджуваному розчині (рис. 10). Точки відповідають експериментальним результатам, а пунктир розділяє області температур та швидкостей течії розчину, де спостерігались особливості на АЧХ (ліворуч від пунктирної лінії) і де вони були відсутні (праворуч пунктиру). Такі особливості на АЧХ при температурах нижче 0,5 К були зареєстровані при ламінарній течії досліджуваного розчину.

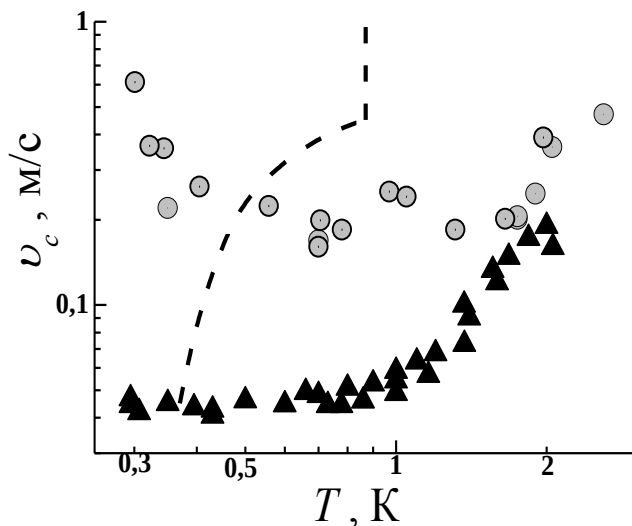


Рис. 10. Температурна залежність величини критичної швидкості переходу до турбулентної течії в 5% розчині (●) та чистому ^4He (▲). Пунктир виділяє область адсорбції атомів ^3He на кор квантового вихора (ліворуч від лінії).

Така поведінка може свідчити про наявність квантованих вихорів в надплинному розчині ще до початку турбулентної течії. Відзначимо, що додавання домішок ^3He призводить до зростання швидкості переходу від ламінарної до турбулентної течії в розчині. Температурна залежність цієї швидкості у розчині носить немонотонний характер та може бути пов'язана з великою кількістю нормальної компоненти гелію, яка при температурі нижче 1 К в основному визначається концентрацією ^3He .

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливе завдання в фізиці низьких температур: експериментально виявлено особливості процесів дисипації енергії в нормальному та надплинному гелії при переході від ламінарної до турбулентної течії рідкого гелію та вплив на такі процеси домішок ^3He та джерела монохроматичного випромінювання при наднизьких температурах. Основні результати, які отримані в дисертаційній роботі, можна сформулювати наступним чином:

1. Знайдено температурну залежність питомого коефіцієнта дисипації в гелії при ламінарній течії та запропоновано його аналітичний опис в гідродинамічному і балістичному режимі.
2. Вперше спостережено акустичне випромінювання джерела монохроматичного випромінювання в надплинному гелії за допомогою датчиків першого звуку. Виявлено, що поведінка джерела монохроматичного випромінювання найбільш точно описується моделлю квадрупольного випромінювача.
3. Встановлено, що в надплинному гелії критична швидкість переходу до турбулентної течії залежить від резонансних умов для джерела монохроматичного випромінювання, та від в'язкості середовища при температурах вище 0,7 К або визначається балістичним розсіюванням теплових збуджень при температурах нижче 0,7 К.
4. Встановлено залежність величини критичної швидкості переходу від ламінарної до турбулентної течії від потужності джерела монохроматичного випромінювання в чистому гелії. Показано, що при

потужностях, менших за 10 нановат, величина критичної швидкості практично не залежить від потужності.

5. Вперше отримано результати про особливості переходу від ламінарної до турбулентної течії в розчині ізотопів гелію. Показано, що додавання домішки ^3He підвищує стійкість ламінарної течії і приводить до зростання критичної швидкості, порівняно з чистим гелієм.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Gritsenko I. A. Transition to turbulence and critical velocity in superfluid solution of ^3He in ^4He / **I. A. Gritsenko**, A. A. Zadorozhko, E. Ya. Rudavskii, V. K. Chagovets, G. A. Sheshin // JLTP. – 2010. – V.158, №. 3/4. – P. 450 - 455.
2. 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. – С. 695 – 702.
3. 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. – С. 1395 – 1402.
4. Gritsenko I. Frequency characteristics of a quartz tuning fork immersed in He II / **I. Gritsenko**, A. Zadorozhko, G. Sheshin // JLTP. – 2013. – V. 171, №. 3/4. – P. 194 – 199.
5. Sheshin G. Mutual interactions of oscillating quartz tuning forks in superfluid ^4He / G. Sheshin, **I. Gritsenko**, D. Schmoranzer, and L. Skrbek // ФНТ. – 2013. – Т. 39, №. 10. – P. 1062 – 1067.
6. Sheshin G. The influence of acoustic emission on the onset of the turbulence flow in He II / G. Sheshin, **I. Gritsenko** // JLTP. – 2014. – V. 175, №. 1/2. – P. 91 – 96.
7. Гриценко И. А. Особенности турбулентного течения сверхтекучей жидкости / **И. А. Гриценко**, А. А. Задорожко, В. К. Чаговец, Г.А. Шешин // Всеукраїнська конференція молодих вчених „Фізика низьких температур”, 1-5 червня 2009р. : тези доповідей. – Україна, Харків, 2012. – С. 126.
8. Gritsenko I. The frequency dependences of the critical velocity of the transition from laminar to turbulent flow of the superfluid ^4He / **I. Gritsenko**, V. Chagovets, E. Rudavskii, G. Sheshin, A. Zadorozhko // International Conference “Physics of liquid matter: Modern problems”, May 28-31, 2010: book of abstracts. Ukraine, Kyiv, – P. 332.
9. Gritsenko I. A. The study of transition from laminar to turbulent flow regime by oscillating quartz fork / A. A. Zadorozhko, V. K. Chagovets, **I. A. Gritsenko**, E. Ya. Rudavskii, G. A. Sheshin // International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”, June 7-11, 2010: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2010. – P. 104.
10. Gritsenko I. On sound emission of quartz tuning forks in liquid helium / G. Sheshin, D. Schmoranzer, M. LaMantia, M. Rotter, V. Chagovets, **I. Gritsenko**, E. Rudavskii, A. Zadorozhko, and L. Skrbek // International

- Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS 2010), August 1-7, 2010: book of abstracts. – France, Grenoble, 2010. – P. 50.
11. Gritsenko I. A. Dissipation mechanism of the first sound in the development of quantum turbulence / A. A. Zadorozhko, **I. A. Gritsenko** // II International Conference for Young Scientists “Low temperature physics”, June 6-10, 2011: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2011. – P. 98.
 12. Gritsenko I. The features of the turbulent flow formation in He-II at high frequencies of oscillations / A. Zadorozhko, V. Chagovets, **I. Gritsenko**, and G. Sheshin // New frontiers of low temperature physics (ULT 2011), August 19-22, 2011: book of abstracts. – South Korea, Daejeon, 2011. – PS2-1.
 13. Gritsenko I. 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 Low Temperature Physics, August 10-17, 2011: book of abstracts. – China, Beijing, 2011. – P. 184.
 14. Gritsenko I. Features of transition from laminar flow to classical and quantum turbulence in superfluid ^4He / G. Sheshin, V. Chagovets, **I. Gritsenko**, E. Rudavskii, A. Zadorozhko // 3rd International Conference on Quantum Electrodynamics and Statistical Physics (QEDSP2011), August 29-September 2, 2011: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2011. – P. 230.
 15. Gritsenko I. Acoustic emission and viscous dissipation of an oscillating quartz tuning fork immersed in He-II / **I. Gritsenko** // 3rd International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”, May 14-18, 2012: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2012. – P. 129.
 16. Gritsenko I. Frequency characteristics of a quartz tuning fork immersed in He II / **I. Gritsenko**, G. Sheshin, A. Zadorozhko // International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS 2012), August 15-21, 2012: book of abstracts. – England, Lancaster, 2012. – PS. 1.21.
 17. Gritsenko I. Transition to turbulence regime in ^3He - ^4He solutions: ^3He condensation on quantized vortices / **I. Gritsenko**, G. Sheshin // 9th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals (CC 2012), September 2-8, 2012: book of abstracts. – Ukraine, Odessa, 2012. – P. 26.
 18. Гриценко І. А. Дослідження акустичного випромінювання кварцових камертонів, які знаходяться у надплинному гелії / **І. А. Гриценко**, Г. О. Шешин, Р. В. Ніконков // «HEUREKA-2013»: International Conference for Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics, May 15-17, 2013: book of abstracts. – Ukraine, Lviv, 2013. – P. E3.
 19. Gritsenko I. Observation of heterogeneous nucleation in dilute ^3He - ^4He mixtures / **I. Gritsenko**, and G. Sheshin // International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS 2013), August 1-6, 2013: book of abstracts. – Japan, Matsue, 2013. – P. 32.
 20. Gritsenko I. Vortex formation and superfluid turbulence / **I. Gritsenko**, G. Sheshin // 28th Research Workshop “Nucleation theory and applications”, April 12-20, 2014 book of abstracts. – Russia, Dubna, 2014. – P. 4.

21. Gritsenko I. Two mechanisms of excitation of superfluid turbulence / **I. Gritsenko**, G. Sheshin // V International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics”, June 2-6, 2014: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2014. – P. 113.
22. Gritsenko I. A. Influence of acoustic emission on the critical velocity of turbulence in superfluid helium / A.A Zadorozhko, G.A. Sheshin, **I.A. Gritsenko** // 27th International Conference on Low Temperature Physics, August 6-13, 2014: book of abstracts. – Argentina, Buenos Aires, 2014. – P. 169.
23. Gritsenko I. The drag coefficient of the oscillating tuning fork immersed in He II / **I. Gritsenko**, A. Tseskis, and G. Sheshin // VI International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics, June 2-5, 2015: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2015. – P. 69.

АНОТАЦІЯ

Гриценко І. А. Режими ламінарної та турбулентної течії гелію та його ізотопічного розчину при наднизьких температурах . – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.09 – фізика низьких температур. – Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, Харків, 2016.

Дисертаційна робота присвячена експериментальному дослідженню впливу акустичного випромінювання, температури, тиску та домішок ізотопу ^3He на перехід до турбулентної течії у надплинному гелії при низьких та наднизьких температурах. Запропоновано залежність, яка описує коефіцієнт питомого опору як в гідродинамічному, так і в балістичному режимі розсіювання теплових збуджень при ламінарній течії чистого гелію. Вперше проведено дослідження по реєстрації акустичного випромінювання камертона в надплинному гелії та показано, що таке випромінювання найбільш точно описується моделлю квадрупольного випромінювача звуку, а ефективність випромінювання залежить від наявності умов резонансу у джерела монохроматичного випромінювання. Встановлено, що на величину критичної швидкості переходу від ламінарної до турбулентної течії істотно впливає наявність акустичного випромінювання камертоном. Вперше, за допомогою методики осцилюючого камертона, показано, що додавання домішок ізотопу ^3He до надплинного гелію підвищує стійкість ламінарної течії.

Ключові слова: ламінарна течія, турбулентність, надплинний гелій, ізотопічний розчин гелію, дисипація енергії, перший звук, осцилюючий кварцовий камертон.

АННОТАЦИЯ

Гриценко И.А. Режимы ламинарного и турбулентного течения гелия и его изотопического раствора при сверхнизких температурах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.09 – физика низких температур.

Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Харьков, 2016.

В диссертационной работе представлены результаты исследования кинетических свойств гелия и концентрированного раствора его изотопов при сверхнизких температурах.

Экспериментальные исследования проводились в ^4He и растворе ^3He в ^4He с концентрацией 5 % в интервале температур от 4,2 К до 0,1 К и интервале давлений от 24,8 атм до давления насыщенного пара гелия. Для получения низких и сверхнизких температур использовался рефрижератор растворения с внешним циклом циркуляции ^3He .

В результате проведенных исследований чистого гелия при ламинарном течении была построена температурная зависимость удельного коэффициента диссипации энергии в гидродинамическом ($T > 0,7$ К) и баллистическом режиме ($T < 0,7$ К). Предложено описание удельного коэффициента диссипации энергии единым уравнением в области низких температур.

Показано, что при условии наличия резонанса механизм диссипации энергии за счет вязкого трения сменяется механизмом рассеяния энергии за счет возбуждения волны первого звука и этот механизм доминирует при низких температурах.

Впервые была проведена прямая регистрация волны первого звука от источника монохроматического излучения (кварцевого камертона) в сверхтекучем гелии. Показано, что его поведение наиболее точно описывается моделью квадрупольного излучателя звука.

При экспериментальном измерении величины критической скорости перехода к турбулентному режиму в гелии было изучено влияния акустического излучения колеблющегося камертона, давления и температуры, на величину критической скорости перехода между режимами. Выяснено, что при выполнении условия резонанса для источника монохроматического излучения (кварцевого камертона) переход к турбулентному режиму течения регистрируется при бóльших значениях критической скорости. Обнаружено появление разброса значений регистрируемой скорости перехода к турбулентному течению при давлениях меньших 5 атм, что связано с наличием резонанса в системе колеблющийся камертон – жидкий гелий – стенка ячейки. Измерения температурной зависимости величины критической скорости в гелии показали, что в интервале температур от 2,1 К до 1,2 К результаты измерений при наличии и отсутствии резонансных условий совпадают из-за доминирования диссипации за счет вязкости. В интервале температур 1,2 К – 0,6 К измеряемая величина критической скорости при наличии акустического излучения намного выше, чем для случая отсутствия резонанса. При $T < 0,6$ К отсутствует зависимость критической скорости от температуры как в случае наличия резонанса, так и его отсутствия.

Результат измерения величины критической скорости перехода к турбулентному режиму течения от величины возбуждающей мощности показал, при мощностях больше 10 нановатт все полученные

экспериментальные данные описываются единой кубической зависимостью, а при меньших мощностях зависимость критической скорости от соответствующей возбуждающей мощности отсутствует.

Проведенные исследования 5 % изотопического раствора показали, что понижение температуры ниже 1 К приводит к появлению и росту нерегулярностей на измеряемых амплитудно-частотных характеристиках. Сравнения экспериментальных результатов с известными литературными данными позволило сделать вывод о том, что для выбранного изотопического раствора адсорбция атомов ^3He на кор квантованного вихря происходит при температурах ниже 0,9 К. Исчезновение скачков на амплитудно-частотных характеристиках с ростом температуры от 0,3 К до 1 К экспериментально подтверждает сделанный вывод. Обнаружено, что добавление примеси ^3He приводит к возрастанию критической скорости перехода от ламинарного к турбулентному течению, по сравнению с чистым гелием. Температурная зависимость критической скорости в растворе имеет немонотонный характер, что может быть связано с большим количеством нормальной компоненты гелия в растворе.

Ключевые слова: ламинарное течение, турбулентность, сверхтекучий гелий, раствор изотопов гелия, диссипация энергии, первый звук, осциллирующий кварцевый камертон.

ABSTRACT

Gritsenko I. A. Laminar and turbulent flow regimes of helium and its isotope solution at ultralow temperatures. – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree in physics and mathematics by speciality 01.04.09 – low temperature physics. – B. I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the NAS of Ukraine, Kharkov, 2016.

The thesis is devoted to the experimental study of flow in quantum liquids and influence of acoustic radiation, temperature, pressure and impurity of ^3He on the transition to turbulent flow in superfluid helium. An empirical relation has been proposed for describing the ratio of the share resistivity coefficient in the hydrodynamic regime and ballistic regime of the thermal excitation scattering in the laminar flow of ^4He . The first studies of the registration of acoustic emission of tuning fork in superfluid helium were carried out. It's shown that the features of such an emission most accurately described by the longitudinal quadrupole model. Efficiency of this model depends on the size of space around the fork. It is established that the value of critical velocity of the transition from laminar to turbulent flow is essentially affected by the presence of acoustic radiation by tuning fork. It is shown for the first time, using oscillating tuning fork, that the impurities of ^3He increase the stability of laminar flow of superfluid helium.

Key words: laminar flow, turbulence, superfluid helium, helium isotopic solution, energy dissipation, first sound, oscillating quartz tuning fork.

Підписано до друку 06.09.2016 р. Формат 60х90/16. Папір офсетний.
Обсяг умовн. друк. арк. 0,9. Папір офсетний. Друк на різнограф.
Тираж 150 прим. Зам. № 20

Надруковано у копі-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
М. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354
www.modelist.in.ua