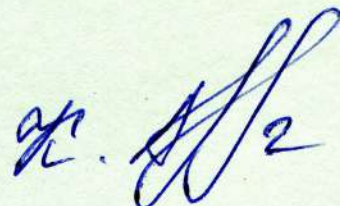


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР  
ім. Б. І. ВЕРКІНА

МИХАЙЛЕНКО Христина Олексіївна



УДК 538.941

**ДИСИПАТИВНІ ПРОЦЕСИ ПРИ РЕЗОНАНСНОМУ ЗБУДЖЕННІ  
СЛАБКО ТУРБУЛЕНТНОЇ ТЕЧІЇ У НАДПЛИННОМУ ГЕЛІЇ**

01.04.09 – фізика низьких температур

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2018



Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий керівник:**

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Шешин Григорій Олександрович**,  
Фізико-технічний інститут низьких температур  
ім. Б. І. Веркіна НАН України,  
старший науковий співробітник відділу  
фізики 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, професор  
**Нємченко Костянтин Едуардович**,  
Харківський національний університет  
ім. В. Н. Каразіна МОН України,  
завідувач кафедри інформаційних технологій в  
фізико-енергетичних системах  
фізико-енергетичного факультету.

Захист відбудеться «9» жовтня 2018 року о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.175.02 при Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України (61103, м. Харків, пр. Науки, 47).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України (61103, м. Харків, пр. Науки, 47).

Автореферат розісланий «3» вересня 2018 р.

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

 М. М. Богдан

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Особливістю виникнення турбулентності у надплинній рідині є поява в ній квантованих вихрів. Характер турбулентності в цілому визначається поведінкою саме квантованих вихрів та кінетичними властивостями самої надплинної рідини. До дисипативних процесів, які в останні роки інтенсивно досліджуються за умов надплинної течії гелію, відносяться в'язке тертя та балістичне розсіювання теплових фононів і ротонів один на одному та на квантованих вихрах. Основною складністю подібних досліджень довгий час була неможливість поділу внесків різних дисипативних процесів, що спостерігались в експериментах. Однак це стало можливим з появою нових методів дослідження, зокрема метода осцилюючого тіла в надплинній рідині. Такі методи дозволяють вимірювати амплітудно-частотні характеристики коливань та величину дисипації енергії осцилюючого тіла.

Найбільш інформативним виявився метод осцилюючого кварцового камертона, за допомогою якого було встановлено перехід від ламінарного режиму течії He II до турбулентного режиму і його подальший розвиток. Було показано, що залежність амплітуди коливань зануреного у гелій тіла від сили, що прикладається, така ж, як і при турбулентності класичної рідини. Але залишалось не виявленим, за яких температур в He II спостерігається перехід від класичної до квантової турбулентності. Раніше було знайдено температурну залежність коефіцієнта опору тіла, що коливається в надплинному гелії, в області низьких температур. Однак залишалось невирішеним важливе питання впливу нормальної компоненти гелію на дисипативні процеси в гідродинамічній та балістичній області температур. Були також відсутні дані щодо частотної залежності дисипативних процесів, оскільки до останнього часу вимірювання з використанням методу кварцового камертона проводились фактично при одній частоті коливань. Тому стало нагальним питання визначення впливу частоти коливань тіла на коефіцієнт опору, починаючи з ламінарного режиму течії надплинного гелію, при різних температурах, особливо в температурній області поблизу переходу між гідродинамічним і балістичним режимами розсіювання теплових збуджень. Фундаментальний інтерес становить також дослідження процесу зародження і розвитку турбулентної течії в умовах мінімально можливого впливу нормальної компоненти на динаміку квантованих вихрів.

Наявність перерахованих важливих невирішених задач у гідродинаміці надплинної рідини зумовлює необхідність проведення систематичних експериментальних досліджень цих явищ, чим і визначається **актуальність** теми дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дослідження, які склали дисертаційну роботу, виконано у відділі фізики квантових рідин та кристалів Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України в межах тематичного плану інституту відповідно до відомчих тем: «Об'ємні та поверхневі наносистеми в квантових рідинах та кристалах» (номер державної реєстрації 0110U007894, термін виконання 2011 –

2015 рр.), «Утворення наноструктур і кінетичні процеси в конденсованому гелії при низьких та наднизьких температурах» (номер державної реєстрації 0116U005034, термін виконання 2016 – 2020 рр.), а також були підтримані в межах проекту науково-дослідних робіт молодих учених НАН України у 2017 р. «Кінетичні властивості наноструктурованих та мезоскопічних квантових систем, утворених конденсованими фазами гелію» (номер державної реєстрації 0117U003472, термін виконання 2017 – 2018 рр.).

**Мета дослідження.** Метою дисертаційної роботи є експериментальне виявлення механізмів дисипації у надплинному гелії за умов його ламінарної та слабко турбулентної течії при наднизьких температурах.

Для досягнення поставлених цілей ставилися і вирішувалися такі **задачі**:

- встановити дисипацію енергії камертона, що коливається з різними частотами, та знайти коефіцієнт опору при ламінарному режимі течії;
- визначити частотну і температурну залежності коефіцієнта приєднаної маси гелію до кварцового камертона, що коливається;
- виявити залежність додаткового дисипативного процесу від швидкості течії гелію при квазіламінарному режимі;
- проаналізувати вплив слабко турбулентного режиму течії надплинного гелію на нелінійну поведінку кварцового камертона, що коливається в надплинному гелії, яка описується рівнянням Дуффінга.

**Об'єктом дослідження** є дисипативні процеси в надплинному гелії при утворенні слабко турбулентної течії при наднизьких температурах.

**Предметом дослідження** є особливості кінетичних характеристик надплинної течії гелію за умов зародження квантованих вихрів.

**Методи дослідження.** Для дослідження дисипативних процесів в надплинному гелії були використані такі методи:

- метод отримання низьких та наднизьких температур за допомогою рефрижератора розчинення  $^3\text{He} - ^4\text{He}$ ;
- метод осцилюючого кварцового камертона, за допомогою якого визначаються дисипативні процеси в надплинному гелії;
- метод автоматизації збору і обробки експериментальних даних.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше виявлено існування у ламінарній течії гелію, в який занурено осцилююче тіло, двох частотно-залежних режимів в'язкого тертя в області гідродинамічного розсіювання теплових збуджень. Межі переходу між режимами відповідає мінімум температурної залежності дисипації, який визначається співвідношенням між характерним розміром осцилюючого тіла та глибиною проникнення в'язкої хвилі.
2. Вперше визначено коефіцієнт приєднаної маси гелію, який встановлює зв'язок між масою гелію, що витіснена осцилюючим тілом, і його резонансною частотою коливань. Показано, що у гідродинамічній області розсіювання теплових збуджень цей коефіцієнт залежить від частоти та температури, а в області балістичного розсіювання його залежність від температури зникає.



3. Вперше виявлено, що при слабко турбулентному режимі течії гелію при швидкостях, вище визначених критичних, відбувається розсіювання теплових збуджень на квантованих вихрах. Встановлено, що при цьому сила тертя гелію пропорційна кубу максимуму швидкості осцилюючого тіла.
4. Вперше показано, що дисипативні явища в надплинному гелії із осцилюючим тілом можуть бути описані в рамках нелінійного рівняння Дуффінга з урахуванням дії зовнішньої змінної сили. В межах цього підходу пояснено відхилення від лінійного режиму залежностей амплітуди швидкості коливань від частоти та збуджуючої сили, що добре узгоджується з експериментальними даними.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати роботи мають фундаментальний характер і поширюють уявлення про природу такого явища, як турбулентність у квантових рідинах. Розуміння природи знайдених в роботі ефектів, які пов'язані з фундаментальними характеристиками надплинного гелію, дозволяє прогнозувати фізичні властивості його конвекційних і турбулентних течій. Результати дисертації можуть стимулювати подальший розвиток актуальних напрямків фізики конденсованого стану при низьких та наднизьких температурах, зокрема фізики нелінійних явищ у гідродинаміці надплинної рідини. Проведені дослідження в режимі ламінарної течії дозволяють проводити аналогії щодо механізмів дисипації енергії в класичних та квантових рідинах. За допомогою методу осцилюючого кварцового камертона можливо дослідити різні дисипативні процеси малої потужності у розчинах ізотопів гелію. Методика усунення акустичного випромінювання, яке виникає при коливанні осцилюючого тіла, має практичне значення і може бути використана при конструюванні сучасних приладів вимірювання в'язкості.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, узагальнені в дисертаційній роботі, отримані в співавторстві при безпосередній участі автора. Дисертант брала активну участь на всіх етапах наукового дослідження, а саме: в постановці завдання, проведенні експериментальних досліджень при низьких і наднизьких температурах, обробці та інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків і написанні статей. Автором особисто знайдено коефіцієнт приєднаної маси гелію, який встановлює зв'язок між масою гелію, що витіснена осцилюючим тілом, і його резонансною частотою коливань. Здобувачем виявлено розсіювання теплових збуджень на квантованих вихрах в умовах слабко турбулентної течії гелію при швидкостях, вищих за критичні. Дисертантом описано дисипативні явища в надплинному гелії із осцилюючим тілом в межах рівняння Дуффінга з урахуванням дії зовнішньої змінної сили та пояснено нелінійні залежності амплітуди швидкості коливань від частоти та збуджуючої сили. Таким чином, особистий внесок автора є визначальним.

#### **Апробація результатів дисертації.**

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

- XXXVII Совещание по физике низких температур (НТ-37), 29 июня–3 июля, 2015, Казань, Россия;

- 6<sup>th</sup> International Conference for Young Scientists «Low temperature physics», June 2–5, 2015, Kharkiv, Ukraine;
- Студентська наукова конференція «Фізика та науково-технічний прогрес», 16 квітня, 2015, Харків, Україна;
- XII Міжнародна конференція «Фізичні явища в твердих тілах», 1–4 грудня, 2015, Харків, Україна;
- 20<sup>th</sup> Research Workshop «Nucleation theory and applications», April 1–30, 2016, Dubna, Russia;
- 7th International Conference «Physics of liquid matter: Modern problems», May 27–30, 2016, Kyiv, Ukraine;
- VII International Conference for Young Scientists «Low temperature physics», June 6–10, 2016, Kharkiv, Ukraine;
- International Conference on Quantum Fluids And Solids, August 10–16, 2016, Prague, Czech Republic;
- VIII International Conference for Professionals & Young Scientists «Low temperature physics», May 29 –June 2, 2017, Kharkiv, Ukraine;
- International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT 2017): Frontiers of Low Temperature Physics, August 17–21, 2017, Heidelberg, Germany;
- XIII Міжнародна конференція «Фізичні явища в твердих тілах», 5–8 грудня, 2017, Харків, Україна.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 22 наукових працях: 5 статтях у провідних фахових наукових виданнях [1–5] та в 17 тезах доповідей у збірниках праць міжнародних та вітчизняних наукових конференцій [6–22].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 123 сторінки. Вона містить 36 рисунків, 2 таблиці та список використаних джерел з 104 найменувань на 9 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

В **анотаціях** державною і англійською мовами стисло викладено основний зміст і висновки дисертації. Представлено основні результати досліджень із зазначеннями наукової новизни та практичного значення. Сформульовано найсуттєвіші положення за кожним із розділів дисертації.

У **вступі** наведена коротка характеристика області досліджень, розкрита суть і стан наукової проблеми, обґрунтована актуальність обраної теми дисертації, визначено мету і завдання досліджень та методи їх проведення, сформульовано основні результати роботи, її наукова новизна та практична значимість отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок дисертанта, представлено відомості про здобувача, апробацію роботи та описано структуру дисертації.

**Перший розділ** «Дослідження течій у надплинному гелії» містить стислий

аналіз наявної наукової літератури щодо ламінарного та турбулентного режимів течії надплинного гелію. Розділ складається з трьох підрозділів.

У **підрозділі 1.1** надана довідкова інформація про надплинний гелій та розглянута поведінка гелію поблизу температури надплинного переходу  $\lambda$ -точки.

У **підрозділі 1.2** коротко описана дисипація енергії осцилюючого тіла, зануреного в гелій, в термінах в'язкості та коефіцієнта опору тіла, що коливається.

**Підрозділ 1.3** присвячений короткому огляду турбулентності в квантових рідинах. Дослідження турбулентності відбувається за допомогою метода осцилюючого кварцового камертона.

**Другий розділ** «Експериментальна база і методика дослідження» містить опис експериментального устаткування, обладнання і методики дослідження дисипативних процесів в гелії. Наведено загальну інформацію про отримання і реєстрацію низьких температур в інтервалі від 4,2 К до 0,1 К.

Для вирішення поставлених у роботі фізичних задач експериментальна комірка була сконструйована таким чином, щоб в неї можливо було завантажувати водночас п'ять кварцових камертонів та знімати експериментальні дані з кожного камертона по черзі.

**Третій розділ** «Дисипативні процеси при ламінарному режимі течії в He II» присвячений дослідженню дисипації кінетичної енергії камертона, зануреного в надплинний гелій, при різних частотах коливань (перший підрозділ) та дослідженню залежності резонансної частоти зануреного в He II кварцового камертона, що коливається, від величини приєднаної маси гелію, яка визначається в'язкістю і густиною нормальної компоненти гелію та рухається в тонкому пристінковому шарі разом з ніжками камертона (другий підрозділ).

Експериментально знайдено залежність питомого коефіцієнта опору від частоти для різних температур в надплинному гелії (рис. 1).

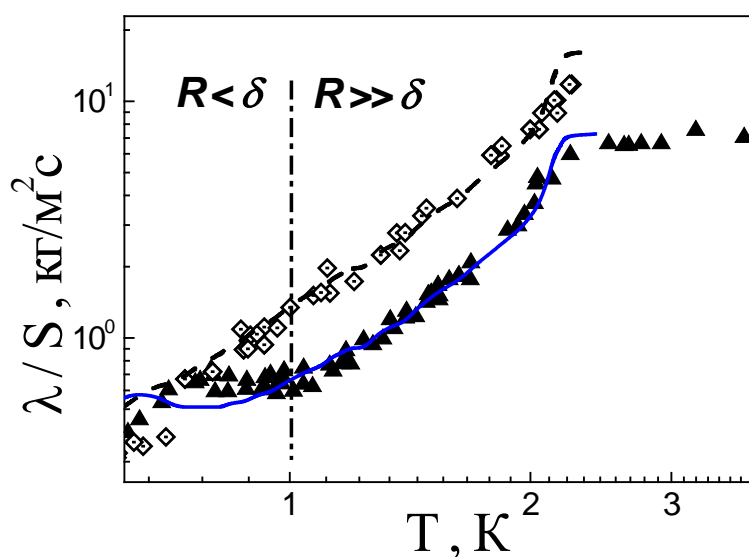


Рис. 1. Температурна залежність питомого коефіцієнта опору  $\lambda/S$  для камертонів з резонансними частотами  $f$ , кГц: 32,7 ( $\diamond$ ) і 6,4 ( $\blacktriangle$ ). Суцільна

лінія – розрахунок за теорією.

Визначаючи температурну залежність коефіцієнта опору, можна встановити механізм дисипативних процесів. Так, було з'ясовано, що весь досліджуваний інтервал температур можна умовно розділити на дві температурні області – гідродинамічну і балістичну області температур.

Як видно з рис. 1, експериментальні та розрахункові дані добре узгоджуються між собою. Для розрахунку було використано вирази для коефіцієнта опору при коливаннях циліндра у в'язкому середовищі. Деяке відхилення розрахунку від експериментальних даних є тільки при температурі  $T \approx 0,6 - 0,7$  К, що обумовлено переходом між гідродинамічним і балістичним режимами розсіювання теплових збуджень.

Був визначений вплив частоти коливань осцилюючого камертона на процеси дисипації їх енергії (рис. 2) при визначенні коефіцієнта опору ламінарного потоку в широкому температурному інтервалі.

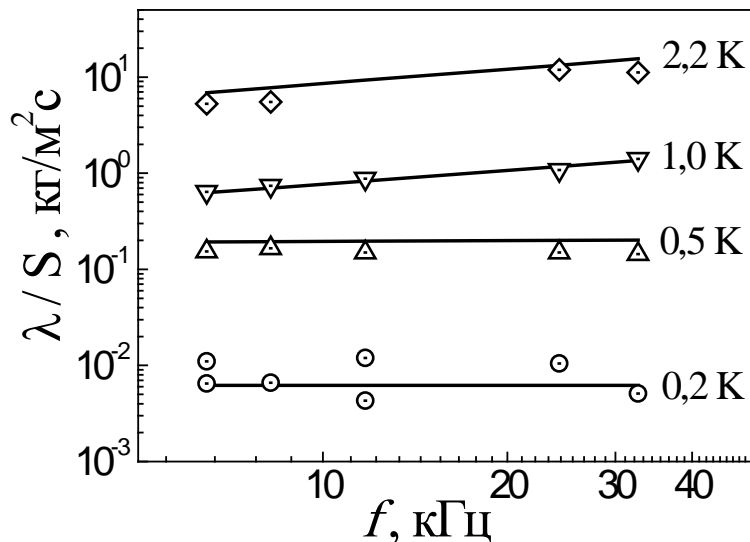


Рис. 2. Залежність питомого коефіцієнта опору від частоти для температур: 2,2 К та 1,0 К – гідродинамічний рух, 0,5 К та 0,2 К – балістичне розсіювання теплових збуджень.

На рис. 2 досліджений інтервал температур складається з трьох умовних ділянок. При  $T > 1,2$  К в області температур, що відповідають гідродинамічному режиму течії рідини, виконується умова  $\delta \ll R$  (де  $\delta$  – глибина проникнення в'язкої хвилі та  $R$  – характерний розмір тіла, що коливається) та спостерігається залежність питомого коефіцієнта опору від частоти коливань  $\lambda S \sim \sqrt{\omega}$  (де  $\lambda$  – коефіцієнт опору,  $S$  – площа поперечного перерізу). У вузькому інтервалі  $0,6 \text{ К} < T < 1,2 \text{ К}$  режим тертя ще гідродинамічний, який переходить в балістичний режим при зниженні температури. Крім того, довжина вільного пробігу теплових збуджень також стає більшою, ніж розмір комірки, при цьому залежність від частоти повинна



зменшуватися аж до повного зникнення. А при  $T < 0,6$  К має місце балістичне розсіювання теплових збуджень камертона, що коливається, при цьому залежність дисипації енергії від частоти відсутня, що можна бачити на рис. 2.

В другому підрозділі розділу 3 надані залежності резонансної частоти від приєднаної маси рідини, що є важливою характеристикою коливального процесу. В роботі визначався коефіцієнт приєднаної маси в залежності від температури (рис. 3) і тиску (рис. 4), і їх значення узгоджуються між собою.

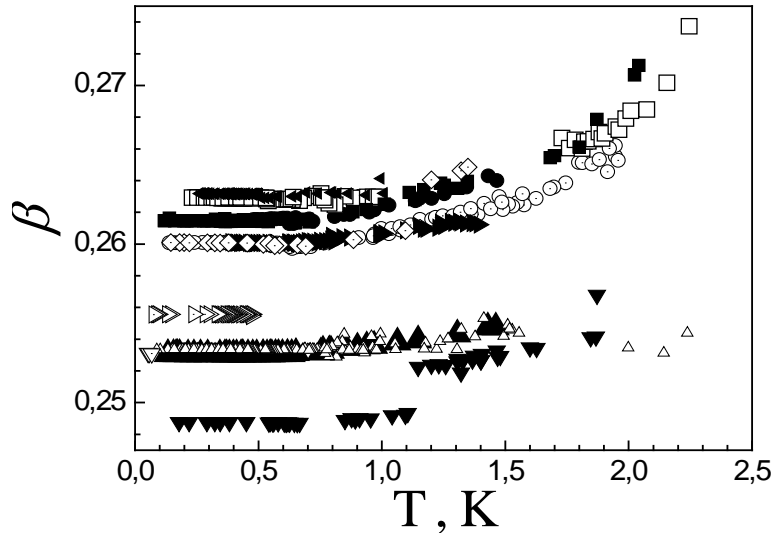


Рис. 3. Температурні залежності коефіцієнта приєднаної маси  $\beta$  для різних камертонів K24 (■, ●), K25 (○, □, ◇), K26 (▶, ◀), K28 (▽, ▷, ▲), K29 (△, ▼) отримані в різних експериментах.

На рис. 3 видно, що при  $T > 1$  К досліджувана величина збільшується з температурою приблизно на 10% при зростанні від  $T$  до  $T_\lambda$ . При  $T < 0,7$  К настає балістичний режим розсіювання теплових збуджень в надплинній рідині і поняття гідродинамічної в'язкості втрачає фізичний зміст, залишаючись справедливим тільки в гідродинамічній межі ( $T > 0,7$  К).

Таким чином, експериментальні дані при  $T < 0,7$  К дають можливість визначити постійну величину коефіцієнта приєднаної маси гелію як:

$$\beta = \left[ \left( \frac{f_{0V}}{f_0(T)} \right)^2 - 1 \right] \frac{m_q}{\rho V} \quad (1)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт приєднаної маси гелію,  $f_0$  – резонансна частота в гелії,  $f_{0V}$  – резонансна частота в вакуумі,  $m_q$  – ефективна маса ніжки камертона,  $\rho$  – повна густина.

На рис. 4. точність значень коефіцієнта приєднаної маси  $\beta$ , визначених із залежності від тиску, на порядок вища, ніж визначених із температурних залежностей, і становить  $\pm 0,1\%$ . Коефіцієнт приєднаної маси зменшується зі збільшенням частоти (див. рис. 5). Така частотна залежність коефіцієнта  $\beta$  може бути пов'язана з впливом прискорення в даному інтервалі частот на

величину приєднаної маси гелію.

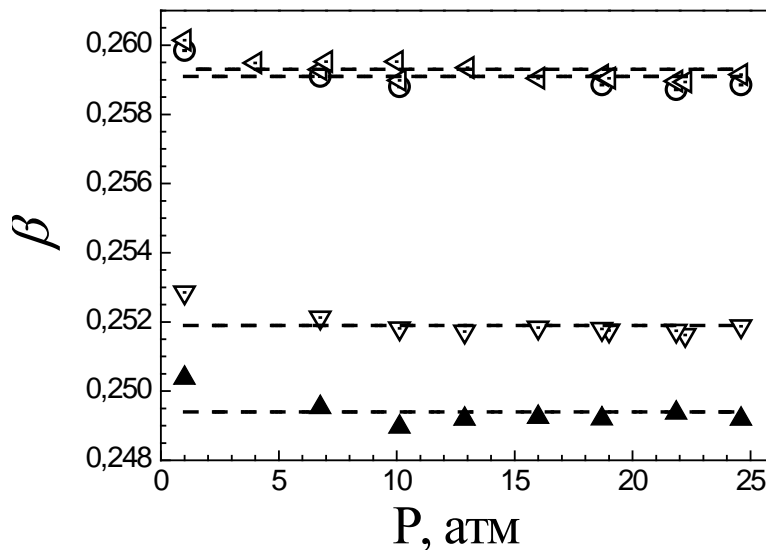


Рис. 4. Залежність коефіцієнта приєднаної маси гелію від тиску для камертонів з різною резонансною частотою: K25 ( $f_0=8,4$  кГц) (▲); K26 ( $f_0=12$  кГц) (○); K28 ( $f_0=24$  кГц) (▷); K29 ( $f_0=32$  кГц) (▽). Пунктирні лінії – усереднене значення коефіцієнта за всіма тисками для кожного камертона.

У четвертому розділі «Особливості квазіламінарної течії в надплинному гелії», що складається з двох підрозділів, описано результати експериментальних досліджень переходу від ламінарної течії до турбулентної. При цьому квазіламінарна течія характеризується додатковим механізмом дисипації за рахунок розсіювання теплових збуджень (фононів) на квантованих вихрах – силою взаємного тертя. Зміна режимів течії добре видна на залежності швидкості коливань камертона від збуджуючої сили у вигляді відхилення від лінійності в гідродинамічній області температур або залому в балістичній області температур.

Зі збільшенням швидкості течії рідини до значень, що перевищують критичну швидкість, відбувається перехід від ламінарної течії до турбулентної, яка характеризується швидким зростанням густини квантованих вихрів (рис. 6). У цих умовах основним дисипативним процесом є взаємне тертя, обумовлене розсіюванням теплових збуджень на квантованих вихрах.

При зниженні температури і зменшенні густини нормальної компоненти зростання швидкості турбулентної течії супроводжується процесами утворення квантованих вихрів і пучків з практично паралельних вихрових ниток, перехрещуванням вихрів і окремих вихрів всередині і поза пучків, утворенням вихрових кілець, виникненням нелінійних хвиль Кельвіна, що супроводжуються випромінюванням високочастотних фононів. Все це призводить до додаткових механізмів дисипації.

Відхилення залежності амплітуди сили від амплітуди швидкості від лінійного закону за умов збільшення швидкості вище за критичну свідчить про

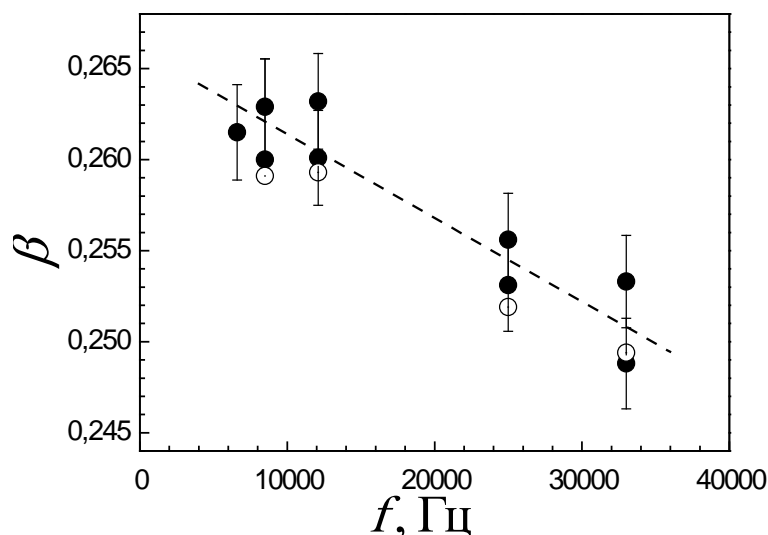


Рис. 5. Частотні залежності коефіцієнта приєднаної маси, визначені з температурної залежності (●) та залежності від тиску (○). Пунктирна лінія є апроксимацією експериментальних даних лінійною залежністю.

появу в Не II додаткового механізму дисипації, відмінного від механізму, обумовленого внутрішнім тертям у камертоні. Щоб оцінити внесок додаткової амплітуди сили тертя (рис. 6), знайдемо для заданого значення амплітуди швидкості різницю між силою, яка вимірюється у експерименті  $F_{exp}$ , і силою, яка визначає внутрішнє тертя у камертоні  $F_q$ :

$$F_{ns} = F_{exp} - \lambda_q v \quad (2)$$

де  $F_{ns}$  – сила взаємного тертя,  $\lambda_q$  – коефіцієнт опору кварцу,  $v$  – швидкість коливань камертона.

Додаткова сила взаємного тертя має кубічну залежить від швидкості коливання камертона. При турбулентному і квазіламінарному режимах течії механізми дисипації енергії коливань однакові, а кількісна відмінність пов'язана з тим, що при турбулентному режимі течії густина квантованих вихрів більша.

Були досліджені нелінійні коливання осцилюючого тіла, зануреного в надплинний гелій, які виникають при збільшенні сили і проявляються викривленням форми резонансної кривої в порівнянні з лоренцевими кривими, типовими для гранично малої сили. Нелінійні резонансні криві можна описати з використанням рівняння Дуффінга для нелінійного осцилятора:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \gamma \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) + \mu x^3(t) = \frac{F(t)}{m} \quad (3)$$

де  $x$  – відхилення ніжки камертона від положення рівноваги під дією збуджуючої сили  $F(t) = F_0 \cos \omega t$ ,  $\omega_0$  – резонансна частота камертона,  $\gamma = 2\pi \Delta f$  – загасання і  $\Delta f$  – ширина резонансної лінії,  $m$  – ефективна маса ніжки камертона і

$\mu x^3$  – складова, відповідальна за нелінійну поведінку осцилятора,  $\mu$  – коефіцієнт нелінійності. Ця складова призводить до зсуву резонансної частоти в

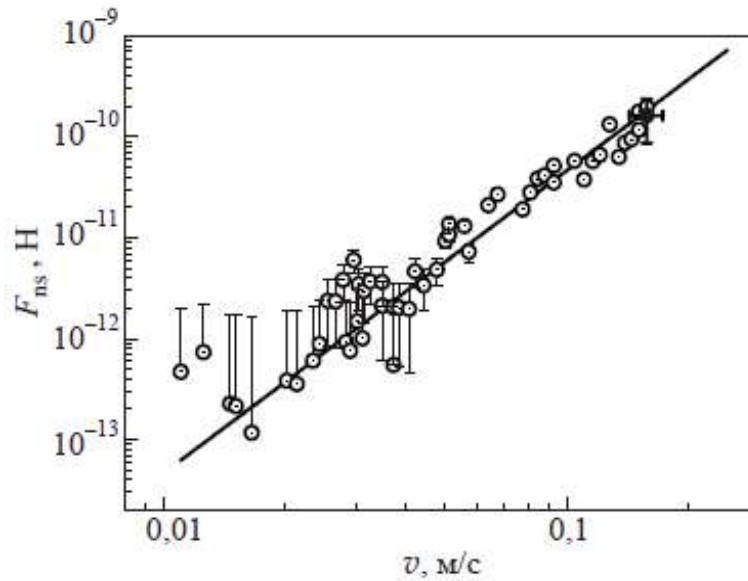


Рис. 6. Надлишкова сила тертя, зумовлена додатковим механізмом дисипації, що з'являється при появі квантованих вихрів у слабо турбулентній течії.

порівнянні з  $\omega_0$ . Причому в залежності від знака  $\mu$  резонансна частота коливань зміщується в бік або більших, або менших частот. У даній роботі резонансна частота коливань зменшується, що відповідає  $\mu < 0$ .

На рис. 7 бачимо, що вже при малих збуджуючих силах амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) має легку несиметричність, обумовлену нелінійністю коливань (пунктирна лінія  $F_0 = 1,5 \cdot 10^{-10}$  Н).

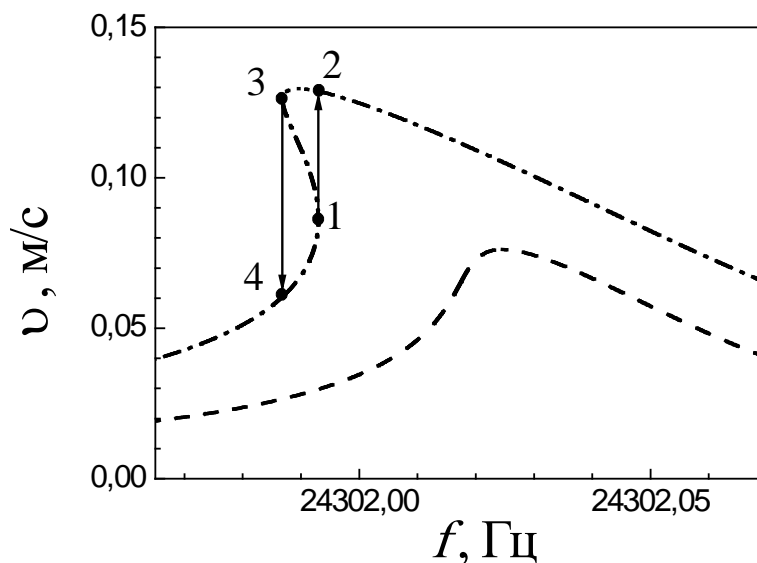


Рис. 7. Амплітудно-частотні характеристики, розраховані з використанням теорії: пунктирна лінія – розрахунок для  $F_0 = 1,5 \cdot 10^{-10}$  Н і  $b = 40$  с/см<sup>2</sup>; штрихпунктирна лінія – для  $F_0 = 3 \cdot 10^{-10}$  Н і  $b = 40$  с/см<sup>2</sup>. Стрілками показано



стрибки амплітуди коливань при появі нестійкості.

Зі збільшенням збуджуючої сили швидкість збільшується, і нелінійність коливань проявляється все сильніше (штрихпунктирна лінія, яка проведена для  $F_0 = 3 \cdot 10^{-10}$  Н), що призводить до зменшення резонансної частоти і появи нестійкості (точки 1 і 3). Нестійкість з'являється в точці 1, якщо рухатися за частотою зліва направо до точки 1, подальший рух за частотою відбувається вправо від точки 2. При русі за частотою в зворотному напрямку (справа наліво) нестійкість, як можна було б очікувати, має наставати в точці 3, причому подальший рух за кривою в у бік менших частот повинен був продовжитися від точки 4 (гістерезис).

В дисертаційній роботі було розраховано коефіцієнт нелінійності  $\mu = \frac{2}{3} \omega_0^3 b$ , де  $b$  – підгінний параметр, який зв'язаний з коефіцієнтом нелінійності  $\mu$  та складає  $9,2 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-2} \text{ м}^{-2}$ .

Крім того, рівняння Дуффінга добре описує і відхилення від лінійності на залежності швидкості коливань від збуджуючої сили (рис. 8).

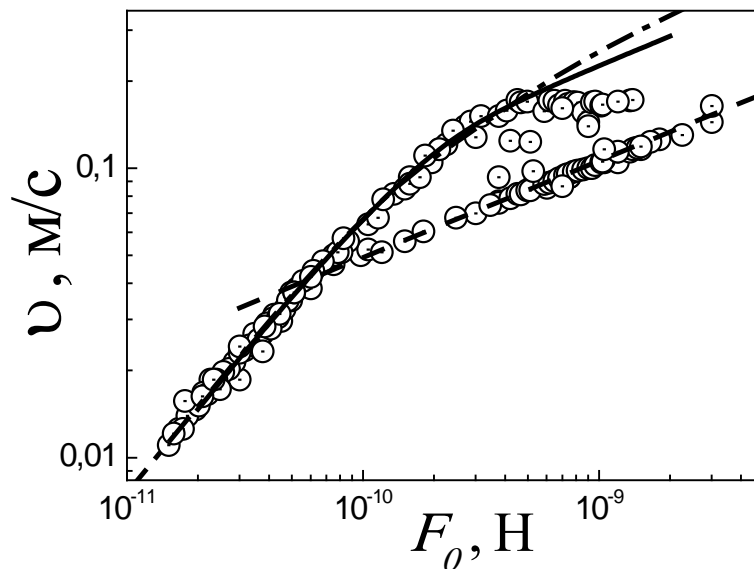


Рис. 8. Залежність швидкості коливань ніжок камертона від збуджуючої сили. Лінії – це розрахунок за двома різними моделями з використанням рішення рівняння Дуффінга (штрихпунктир) та при врахуванні кубічного члена у виразі для сили взаємного тертя (суцільна лінія). Пунктирна лінія – режим розвиненої турбулентності.

Штрихпунктирною лінією на рис. 8 показана залежність, що враховує внесок взаємного тертя, кубічного за швидкістю, в дисипативні процеси в додаток до лінійного внеску, пунктирна лінія відповідає турбулентній течії, коли  $F_0 \sim v^3$ .

Як видно з рисунка, при врахуванні нелінійності коливань (викривлення форми резонансної кривої) амплітуда швидкості в залежності від сили, що прикладається, є нелінійною функцією. Також є добра згода експериментальних даних і розрахунку, який проведено з використанням

рівняння Дуффінга (суцільна лінія на рис. 8).

Таким чином, виявляється, що експериментальні дані при слабко турбулентній (квазіламинарній) течії на рис. 8 можуть бути описані двома моделями – як з використанням рішення рівняння Дуффінга, так і при врахуванні кубічного члена у виразі для сили взаємного тертя.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі було вирішено важливе наукове завдання, яке має істотне значення для фізики низьких температур, а саме: експериментально виявлено механізми дисипації у надплинному гелії за умов його ламінарної та слабко турбулентної течії при наднизьких температурах.

До основних узагальнених результатів і висновків дисертації слід віднести такі:

1. Показано, що при  $T > 0,7$  К в ламінарній течії гелію (гідродинамічна область розсіювання теплових збуджень) існує два режими в'язкого тертя, що відрізняються за частотою. На температурній залежності дисипації показана межа переходу між режимами, яка проявляється у вигляді мінімуму на цій залежності та визначається співвідношенням між характерним розміром осцилюючого тіла та глибиною проникнення в'язкої хвилі.
2. Визначено коефіцієнт приєднаної маси гелію, який встановлює зв'язок між масою гелію, що витіснена осцилюючим тілом, і його резонансною частотою коливань у гідродинамічній області розсіювання теплових збуджень. Показано, що в цій області коефіцієнт приєднаної маси залежить від частоти та температури, а в області балістичного розсіювання його залежність від температури зникає.
3. Експериментально виявлено, що при слабко турбулентному режимі течії гелію при  $v \geq 0,046$  см/с відбувається розсіювання теплових збуджень на квантованих вихрах. Встановлено, що при цьому сила тертя гелію пропорційна кубу максимуму швидкості осцилюючого тіла.
4. Показано, що дисипативні механізми поглинання в надплинному гелії із осцилюючим тілом можуть бути описані нелінійним рівнянням Дуффінга з урахуванням дії зовнішньої сили. В межах цього підходу пояснено відхилення від лінійного режиму залежностей амплітуди швидкості коливань від частоти та збуджуючої сили, що добре узгоджується з експериментальними даними. Визначено коефіцієнт нелінійності, що не залежить від швидкості коливань.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Диссипация кинетической энергии камертона, погруженного в сверхтекучий гелий, при различных частотах / И. А. Гриценко, К. А. Клокол, С. С. Соколов, Г. А. Шешин // ФНТ. – 2016. – Т. 42, №1. – С. 28-34.

2. Особенности квазиустойчивого ламинарного течения He II и дополнительный диссипативный процесс / И. А. Гриценко, **К. А. Клокол**, С. С. Соколов, Г. А. Шешин // ФНТ. – 2016. – Т. 42, №3. – С. 211-215.

3. The frequency dependence of the added mass of quartz tuning fork immersed in He II / I. Gritsenko, **К. Klokol**, S. Sokolov, G. Sheshin // JLTP. – 2017. – V.187, №. 5/6. – P. 433 – 438.

4. Присоединенная масса при колебаниях кварцевого камертона в He II / И. А. Гриценко, **К. А. Михайленко**, С. С. Соколов, Г. А. Шешин // ФНТ. – 2017. – Т. 43, №3. – С. 391-395.

5. Нелинейные явления при колебаниях кварцевого камертона, погруженного в сверхтекучий гелий / И. А. Гриценко, **К. А. Михайленко**, С. С. Соколов, Г. А. Шешин // ФНТ. – 2018. – Т. 44, №1. – С. 46-52.

6. Метод колеблющегося кварцевого камертона и диссипативные процессы в He II / **К. А. Клокол**, Г. А. Шешин // Студентська наукова конференція «Фізика та науково-технічний прогрес», 16 квітня, 2015: тези доповідей – Україна, Харків, 2015. – С.14.

7. Methodic of oscillating quartz tuning fork and dissipative process in He II / I. Gritsenko, **К. Klokol**, G. Sheshin // VI Int. Conf. for Young Scientists «Low temperature physics», June 2–5, 2015: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2015. – P. 74.

8. Коэффициент сопротивления колеблющегося кварцевого камертона погруженного в сверхтекучий гелий / И. А. Гриценко, **К. А. Клокол**, Г. А. Шешин // XXXVII Собрание по физике низких температур (НТ-37), 29 июня–3 июля, 2015: тезисы докл. – Россия, Казань, 2015. – С.265-266.

9. Особенности рассеяния тепловых возбуждений в He II квантованными вихрями / И. А. Гриценко, **К. А. Клокол**, С. С. Соколов, Г. А. Шешин // XII Міжнародна конференція «Фізичні явища в твердих тілах», 14 грудень, 2015: тези доповідей – Україна, Харків, 2015. – С.33.

10. Features of quasi-stabile laminar flow of superfluid helium and the mutual friction / I. Gritsenko, **К. Klokol**, S. Sokolov, G. Sheshin // 20<sup>th</sup> Research Workshop «Nucleation Theory and Applications», April 1–30, 2016: book of abstr. – Russia, Dubna, 2016. – P. 42.

11. The dissipation of the kinetic energy of a tuning fork immersed in superfluid helium at different frequencies / I. Gritsenko, **К. Klokol**, S. Sokolov, G. Sheshin // 20<sup>th</sup> Research Workshop «Nucleation Theory and Applications», April 1–30, 2016: book of abstr. – Russia, Dubna, 2016. – P. 42.

12. Quntum turbulence and quasistabile laminar flow He II / I. Gritsenko, **К. Klokol**, S. Sokolov, G. Sheshin // VII International Conference Physics of liquid matter: modern problems, May 27–30, 2016 : book of abstr. – Ukraine, Kyiv, 2016. – P. 50.

13. Kinetic energy dissipation of a tuning fork immersed in superfluid helium at different temperatures / I. Gritsenko, **К. Klokol**, G. Sheshin // VII International Conference Physics of liquid matter: modern problems, May 27–30, 2016: book of abstr. – Ukraine, Kyiv, 2016. – P. 52.

14. Flow of superfluid helium at high Reynolds number / I. Gritsenko, **К. Klokol**,

G. Sheshin // VII International Conference Physics of liquid matter: modern problems, May 27–30, 2016: book of abstr. – Ukraine, Kyiv, 2016. – P. 51.

15. Added mass of the oscillating body immersed in superfluid helium in a turbulent flow / I. Gritsenko, **K. Klokol**, G. Sheshin // VII International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics», June 6–10, 2016: book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2016. – P. 120.

16. Study of quasi-laminar flow in superfluid helium using quartz tuning fork / I. Gritsenko, **K. Klokol**, S. Sokolov, G. Sheshin // VII International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics», June 6–10, 2016: book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2016. – P. 116.

17. The flow resistance of the oscillating tuning fork immersed in superfluid helium / I. Gritsenko, **K. Klokol**, A. Tseskis, G. Sheshin // International Conference on Quantum Fluids And Solids, August 10–16, 2016: – book of abstr. – Czech Republic, Prague, 2016. – P. 59.

18. Added mass of the He II in experiments with oscillating quartz tuning fork / I. Gritsenko, **K. Klokol**, S. Sokolov, G. Sheshin // International Conference on Quantum Fluids And Solids, August 10–16, 2016: – book of abstr. – Czech Republic, Prague, 2016. – P. 114.

19. The drag coefficient of oscillating objects in liquid helium / I. A. Gritsenko, T. A. Dubchak, **K. O. Mykhailenko**, S. S. Sokolov, G. A. Sheshin // VII International Conference for Professionals & Young Scientists «Low Temperature Physics», May 29–June 2, 2017: book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2017. – P. 117.

20. The dissipative processes depended on the oscillating tuning fork immersed in He II / **K. O. Mykhailenko**, I. A. Gritsenko, T. A. Dubchak, S. S. Sokolov, G. A. Sheshin // VII International Conference for Professionals & Young Scientists «Low Temperature Physics», May 29–June 2, 2017: book of abstr. – Ukraine, Kharkiv, 2017. – P. 126.

21. Nonlinear behavior and dissipation of the quartz tuning fork immersed in He II / I. A. Gritsenko, **K. O. Mykhailenko**, S. S. Sokolov, G. A. Sheshin // International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT 2017): Frontiers of Low Temperature Physics, August 17–21, 2017: book of abstr. – Germany, Heidelberg, 2017. – P. 19.

22. Альтернативне пояснення нелінійної поведінки кварцового камертона, що коливається у надплинному гелії / И. А. Гриценко, Т. А. Дубчак, **Х. О. Михайленко**, С. С. Соколов, Г. А. Шешин // XIII Міжнародна конференція «Фізичні явища в твердих тілах», 5–8 грудень, 2017: тези доповідей – Україна, Харків, 2017. – С.49.

## АНОТАЦІЯ

**Михайленко Х. О. Дисипативні процеси при резонансному збудженні слабо турбулентної течії у надплинному гелії. – 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, 2018.

Дисертацію присвячено експериментальному дослідженню дисипативних процесів при ламінарній і слабо турбулентній течії надплинного гелію при низьких температурах. Виявлено особливості виникнення слабо турбулентної течії гелію, при якій спостерігається ефект взаємного тертя – розсіювання фононів на квантованих вихрах. Показано, що перехід від ламінарного режиму до турбулентного відбувається при резонансному збудженні осцилюючим тілом течії гелію і досягненні ним критичної швидкості. Встановлено, що при цьому сила тертя гелію пропорційна кубу максимуму швидкості осцилюючого тіла. В межах нелінійного рівняння Дуффінга з урахуванням дії зовнішньої сили описано дисипативні явища в надплинному гелії із осцилюючим тілом, зокрема нелінійність залежності швидкості його коливань від збуджуючої сили. Знайдено існування двох частотно-залежних режимів в'язкого тертя у ламінарній течії гелію в області гідродинамічного розсіювання теплових збуджень. Встановлено зв'язок між масою гелію, що витіснена осцилюючим тілом, і його резонансною частотою коливань, та показано, що у цій області коефіцієнт приєднаної маси гелію залежить від частоти та температури.

**Ключові слова:** надплинний гелій, ламінарна течія, турбулентність, дисипативні процеси, розсіювання фононів, квантовані вихри, кварцовий камертон, приєднана маса гелію.

## АННОТАЦІЯ

**Михайленко К. А. Диссипативные процессы при резонансном возбуждении слабо турбулентного течения в сверхтекучем гелии. – 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, 2018.

Диссертация посвящена экспериментальному изучению диссипативных процессов различной природы при ламинарном и слабо турбулентном течениях сверхтекучего гелия при низких температурах. Особое внимание в диссертации уделяется выяснению особенностей квазиламинарного течения жидкого гелия, при котором теряется устойчивость ламинарного движения при наложении на него малых возмущений в виде двумерных колебаний, распространяющихся в направлении основного течения, и проявляется рассеянием фононов на квантованных вихрях – взаимным трением.

Диссипативные процессы в сверхтекучем гелии исследованы с помощью метода осциллирующего кварцевого камертона. В работе использовались кварцевые камертоны с резонансными частотами от 6,6 кГц до 33 кГц.

При ламинарном режиме течения, когда температура He II выше 0,7 К, имеется гидродинамическое течение, где основным механизмом диссипации является вязкостное трение жидкости о поверхность колеблющегося тела, которое определяется в основном температурной зависимостью плотности

нормальной компоненты. При  $T < 0,7$  К диссипация кинетической энергии колебаний камертона определяется баллистическим рассеянием тепловых возбуждений на ножках камертона.

По мере увеличения скорости колебаний и достижения критической скорости течения сверхтекучей жидкости наблюдается переход от ламинарного режима течения к турбулентному. При этом турбулентное течение характеризуется дополнительным механизмом диссипации за счет рассеяния тепловых возбуждений (фононов) на квантованных вихрях.

В эксперименте измерялись амплитудно-частотные характеристики камертона при различных возбуждающих силах. При малых скоростях колебаний возбуждающая сила была пропорциональна скорости колебаний. С увеличением этой скорости при некоторой критической скорости  $0,046$  м/с на зависимости скорости колебаний камертона от возбуждающей силы наблюдалось отклонение от линейной зависимости, что объясняется появлением дополнительной силы трения, связанной с рождением квантованных вихрей и увеличением их плотности, а также рассеянием на них тепловых возбуждений. Как показал анализ экспериментальных данных, дальнейшее увеличение скорости колебаний приводило к увеличению дополнительной силы трения, пропорциональной кубу скорости колебаний. Также был проведен анализ амплитудно-частотных характеристик камертона с использованием решения уравнения Дуффинга для нелинейного осциллятора. Было показано, что все резонансные кривые можно описать уравнением Дуффинга с использованием одного подгоночного параметра – коэффициента нелинейности, который и был определен для разных возбуждающих сил из условия согласия с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** сверхтекучий гелий, ламинарное течение, турбулентность, диссипативные процессы, рассеяние фононов, квантованные вихри, кварцевый камертон, присоединенная масса гелия.

## ABSTRACT

**K. O. Mykhailenko. Dissipative processes at resonant excitation of a weakly turbulent flow in superfluid helium. – 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, Kharkiv, 2018.

The dissertation is devoted to the experimental study of dissipative processes in laminar and weakly turbulent flow of superfluid helium at low temperatures. The features of the occurrence of a weakly turbulent helium flow are revealed. In a weakly turbulent flow the effect of mutual friction is observed, namely scattering of phonons on quantized vortices. It is shown that the transition from the laminar regime to the turbulent occurs at resonance excitation of the oscillating body of the current of helium and at reaching a critical velocity. It is established that at the same time, the friction force of helium is proportional to the cube of the maximum velocity of the oscillating body. In the framework of the nonlinear Duffing equation, taking into

account the action of external force, dissipative phenomena in superfluid helium with an oscillating body are described, in particular, the nonlinearity of the dependence of the velocity of its oscillations on the excitatory force is investigated . The existence of two frequency dependent regimes of viscous friction in the laminar flow of helium in the region of hydrodynamic scattering of thermal excitations has been found. A connection between the mass of helium displaced by the oscillating body and its resonant frequency of oscillations has been established, and it has been shown that in this region the coefficient of the connected mass of helium depends on the frequency and temperature.

**Keywords:** superfluid helium, laminar flow, turbulence, dissipative processes, scattering of phonons, quantized vortices, quartz tuning fork, added mass.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. № 394-18.  
Підписано до друку 29.08.2018. 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.

---

---

**СТИЛЬ**®  
**ИЗДАТ**  
ТИПОГРАФІЯ  
[www.stil-izdat.com](http://www.stil-izdat.com)