МІНІСТЕРСТВО ОСІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ННІ комп'ютерної фізики та енергетики

Кафедра теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр»

«Сила турбулентного опору при коливаннях кварцового камертона в надплинних розчинах ^{3}He - ^{4}He»

Виконала студентка 6 курсу, групи НФ-62

Сидоренко Ж. В.

Спеціальність:

105 Прикладна фізика та наноматеріали

Керівник :

д. ф. м. н., професор Чаговець В. К.

Рецензент : д. ф. м. н., професор Соколов С.С.

Харків – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

ННІ комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Юрій МАЦЕВИТИЙ

"____" _____20___року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

_____Сидоренко Жанна Валентинівна _____
(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи «Сила турбулентного опору при коливаннях кварцового камертона в надплинних розчинах ^{3}He - ^{4}He».
керівник роботи Чаговець Валерій Костянтинович, професор, д.ф-м.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від "___"_____20__року №___

2. Строк подання студентом роботи_____

3. Перелік питань, які потрібно розробити:
Освоїти метод дослідження турбулентності в надплинних розчинах ^{3}He-^{4}He за допомогою кварцового камертону.
Провести аналіз амплітудно - частотних характеристик коливань камертону в розчині ^{3}He - ^{4}He та встановити умови виникнення турбулентного опору.
Провести розрахунки швидкості течії розчину від збуджуючої сили.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Ознайомитися з методикою низькотемпературного експерименту.
2	Провести аналіз методів вивчення турбулентності в надплинному гелії.
3	Ознайомитися з методом дослідження турбулентності в надплинних розчинах ^{3}He-^{4}He за допомогою кварцового камертону.
4	Провести аналіз амплітудно-частотних характеристик коливань камертону в розчині ^{3}He-^{4}He та встановити умови виникнення турбулентного опору.
5	Провести розрахунки швидкості течії розчину від збуджуючої сили.
6	Встановити критичну швидкість виникнення турбулентного опору.
7	Зробити висновки з проведеної роботи.

5. Дата видачі завдання_____

Студент _____ ___Жанна СИДОРЕНКО___
підпис

Керівник роботи _____ ____Валерій ЧАГОВЕЦЬ___
підпис

РЕФЕРАТ

Сидоренко Жанна Валентинівна “Сила турбулентного опору при коливаннях кварцового камертона в надплинних розчинах ^{3}He - ^{4}He ”.

Кваліфікаційна робота магістр з прикладної фізики.

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 47 сторінок, із них основного тексту 37 сторінок, 20 рисунків за текстом, 9 формул, список використаних джерел із 16 найменувань на 2 сторінках.

В даній роботі були проведені розрахунки сили турбулентного опору та коефіцієнта опору, виконаних на основі експериментальних даних резонансів комерційних кварцових камертонів, занурених в концентровані розчини ^{3}He в ^{4}He. Приведені описання устаткування та методики експерименту для отримання експериментальних даних, використаних в роботі. Отримано залежності сили турбулентного опору і коефіцієнта опору та внеску турбулентності при коливаннях камертона в розчинах, які містять 5% та 15% ^{3}He в ^{4}He, як функції амплітуди швидкості коливання ніжки камертона в інтервалі температур 0,4 – 2,5 К. Проведено порівняння цих залежностей з аналогічними власними залежностями, отриманими в чистому ^{4}He, а також отриманими іншими науковими групами.

Ключові слова: надплинний гелій, розчини ^{3}He - ^{4}He, камертон, турбулентний опір, рефрижератор, амплітудно-частотна залежність, резонанс, швидкість.

РЕФЕРАТ

Сидоренко Жанна Валентиновна "Сила турбулентного сопротивления при колебаниях кварцевого камертона в сверхтекучих растворах ^{3}He и ^{4}He".

Квалификационная работа магистр по прикладной физики.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников. Общий объем работы составляет 47 страниц, из них основного текста 37 страниц, 20 рисунков по тексту, 9 формулы, список использованных источников из 16 наименований на 2 страницах.

В данной работе были проведены расчеты силы турбулентного сопротивления и коэффициента сопротивления, выполненных на основе экспериментальных данных резонансов коммерческих кварцевых камертонов, погруженных в концентрированные растворы ^{3}He - ^{4}He. Приведены описания оборудования и методики эксперимента для получения экспериментальных данных, использованных в работе. Получены зависимости силы турбулентного сопротивления и коэффициента сопротивления и взноса турбулентности при колебаниях камертона в растворах, содержащих 5% и 15% ^{3}He в ^{4}He**,** как функции амплитуды скорости колебания ножки камертона в интервале температур 0,4 – 2,5 К. Проведено сравнение этих зависимостей с аналогичными собственными зависимостями, полученными в чистом ^{4}He**,** а также полученными другими научными группами.

Ключевые слова: сверхтекучий гелий, растворы ^{3}He - ^{4}He, камертон, турбулентное сопротивление, рефрижератор, амплитудно-частотная зависимость, резонанс, скорость.

Abstract

Sydorenko Zhanna Valentynivna "The force of turbulent drag during oscillations of quartz tuning fork in superfluid solutions 3He - 4He."

Qualification work master in applied physics.

The work consists of the introduction, three sections, conclusions, a list of sources used. The total workload is 47 pages, of which the main text is 37 pages, 20 drawings by text, 9 formulas, a list of sources used from 16 names on 2 pages.

In this work, calculations of turbulent drag force and drag coefficient were made based on experimental data of resonances of commercial quartz forks immersed in concentrated solutions 3He in 4He. Descriptions of the equipment and procedure of the experiment for obtaining experimental data used in the work are given. Dependencies of turbulent drag force and drag coefficient and turbulence contribution at tuning fork oscillations in solutions that contain 5% and 15% 3He in 4He are obtained as a function of amplitude of oscillation rate of tuning fork leg in temperature interval 0.4-2.5 K. Comparison of these dependencies with similar self-made dependencies obtained in pure 4He was made, as well as those obtained by other scientific groups.

Keywords: superfluid helium, solutions 3He - 4He, tuning fork, turbulent drag, refrigerator, amplitude-frequency dependence, resonance, speed.

ЗМІСТ

ВСТУП ……8

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ……10

1.1 Властивості надплинного гелію та розчинів ^{3}He-^{4}He …….....10

1.2 Число Рейнольдса ……16

1.3 Ламінарний та турбулентний режим рідини 18

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ……....23

2.1 Метод кварцового камертона ……..23

2.2 Рефрижератор випаровування ……..……25

2.3 Схема експериментальної установки …….27

2.4 Система вимірювання температури ……32

3 ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ АНАЛІЗ ……..33

3.1 Внесок турбулентної сили в опір потоку ……...34

3.2 Коефіцієнт опору середовища …….36

3.3 Коефіцієнт турбулентного опору середовища ……..……39

3.4. Розрахунки параметрів для коефіцієнта опору середовища ……..…41

ВИСНОВКИ ……43

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ ……46

ВСТУП

Актуальність теми:

В наш час існує великий інтерес до поведінки вібруючих об’єктів, занурених в квантові рідини ^{3}He в ^{4}He. На цей час різними науковими групами були проведені дослідження процесів затухання коливань провідників, сіточок, сфер та кварцових камертонів в надплинному ^{4}He. Значною мірою ці дослідження пов’язані з вивченням виникнення і розвитку квантової турбулентності. Механічні зонди дають багато інформації про динаміку надплинних рідин та їх збудження. Вимірювання резонансної частоти надають інформацію про інерційний зворотний потік навколо об’єкта, в той час, як затухання виміряє дисипації надплинної і нормальної компонент рідини. Вібруючі об’єкти також дуже чутливі до виникнення і еволюції квантових вихрів в надплинному стані - «квантової турбулентності».

Залежності амплітуди швидкості коливання ніжки камертона від збуджуючої сили при малих швидкостях показують лінійну силу гальмування. При збільшенні швидкості відбувається перехід, відповідний появі додаткового «турбулентного опору», що виникає через появу вихрових ліній в рідкому гелії. Перехід від лінійного затухання (в ламінарному потоці) до турбулентного відбувається при певній критичній швидкості, яка має температурну залежність. Це вказує на те, що опір в значній мірі визначається компонентом нормальної рідини і зменшується надтекучим компонентом рідини навіть у присутності турбулентності. Таким чином, питання про вплив нормальної компоненти на зародження і розвиток турбулентного стану представляє особливий інтерес і актуальність. Для цієї мети дуже корисні експерименти з надплинними розчинами ^{3}He в ^{4}He, де, змінюючи концентрацію розчину, можна істотно змінювати густину нормальної компоненти.

У дипломній роботі наведені результати розрахунків сили турбулентного опору та коефіцієнта опору, виконаних на основі експериментальних даних резонансів комерційних кварцових камертонів, занурених в концентровані розчини ^{3}He в ^{4}He. Отримано залежності сили турбулентного опору і коефіцієнта опору та внеску турбулентності при коливаннях камертона в розчинах, які містять 5% та 15% ^{3}He в ^{4}He, як функції амплітуди швидкості коливання ніжки камертона в інтервалі температур 0,4 – 2,5 К. Проведено порівняння цих залежностей з аналогічними власними залежностями, отриманими в чистому ^{4}He, а також отриманими іншими науковими групами.

Основна мета даної роботи: дослідження турбулентного стану течії в надплинному гелію.

Об'єкт дослідження: процеси виникнення вихорів в надплинній рідині та розвитку турбулентного стану.

Предмет дослідження: визначення залежності сили турбулентного опору, коефіцієнта опору та внеску турбулентності в коефіцієнт опору при коливаннях кварцового камертона в надплинних розчинах 5% та 15% ^{3}He в ^{4}He, як функції амплітуди швидкості коливання ніжки камертона.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Властивості надплинного гелію та розчинів ^{3}He-^{4}He

Рідкий гелій є найбільш важливою речовиною для низькотемпературної фізики. У всіх методах охолодження до температур нижче 10 К використовується безпосередньо тільки гелій, а при отриманні дуже низьких температур, гелій застосовується в якості попередніх ступенів. Гелій (^{4}He), що має атомну вагу 4, його критична температура 5,25 К. Тобто, в рідкому стані він знаходиться нижче цієї температури. Кипить при 4,21 К, коли має тиск 1 атм.

Спочатку рідкий гелій вживали виключно, як засіб для просування в низькотемпературну область, однак дослідження проведенні в наступні десятиліття, абсолютно очевидно показали, що гелій є досить цікавою рідиною, яка проявляє багато унікальних властивостей. В той час, як в перші роки газоподібний ^{4}He для досліджень добували з мінералів, в даний час гелій отримують виключно з природних газових джерел, багатих гелієм. В обох випадках він є продуктом радіоактивного альфа розпаду. Газові джерела зокрема в США, Польщі, Нідерландах, містять до 10 % гелію [1].

Звичайний стабільний ізотоп гелію є - ^{4}He. При абсолютному нулі нормальним його станом є рідкий, це говорить про те ,що він не твердіє при температурах близьких до абсолютного нуля. Твердим він може бути також. Але твердого стану він набуває під підвищеним тиском. Коли він досягає абсолютного нуля то для його кристалізації треба тиск в 25,27 атм. Ця унікальність ^{4}He пояснюється високою енергією його нульових коливань, котрі заважають утворенню стійкої кристалічної гратки, «рис. 1.1.».

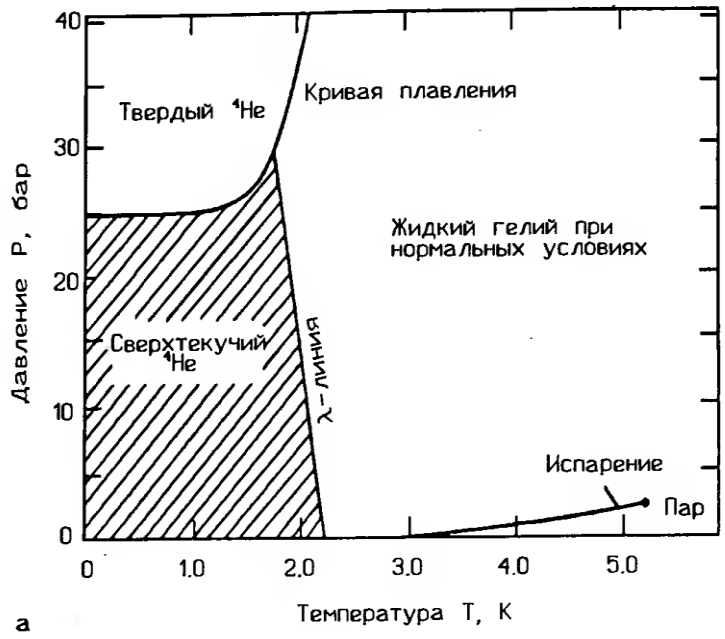


Рис. 1.1. Фазова діаграма ^{4}He в P-T координатах.

Багато властивостей основних речовин, в тому числі рідкого гелію, були виявлені завдяки теплоємності. Перш за все, теплоємність рідкого гелію є дуже великою в порівнянні з теплоємністю інших матеріалів при низьких температурах. Крім того, прихована теплота випаровування рідкого гелію – хоча вона на багато менше прихованої теплоти випаровування інших речовин – велика в порівнянні з теплоємністю цих речовин при низьких температурах, що дозволяє нам охолодити різні матеріали, наприклад, метали за допомогою рідкого гелію. Цей чудовий факт має велике значення для низькотемпературної фізики. Він означає, що теплова поведінка, наприклад час теплової релаксації, низькотемпературної апаратури в найбільшій мірі визначається кількістю та тепловою поведінкою, що містить рідкий гелій.

При низьких температурах властивості речовин сильно змінюються за рахунок статистичних або квантових ефектів. Як ми бачимо «рис. 1.2.», теплоємність ^{4}He має різкий максимум при ~ 2 К, вказуючи на фазовий перехід до нового стану цієї речовини. Виявлення цього фазового переходу стало великою несподіванкою для вчених. Тому коли Л. Дана та Г.Камерлінг-

Оннес в 1920р. виміряли теплоємність рідкого гелію та побачили аномальне збільшення теплоємності поблизу 2К, вони не опублікували дані при цих температурах, вважаючи, що вони пов'язані з деякими експериментальними помилками. Пізніше В. Кеєзом та К. Клаузиус в 1932р. в цій же лабораторії виміряли теплоємність рідкого гелію і знову побачили різкий пік теплоємності. Вони вірили своїм даним, що в даній рідині при цій температурі має місце фазовий перехід, до унікального «надплинного стану» ^{4}He.

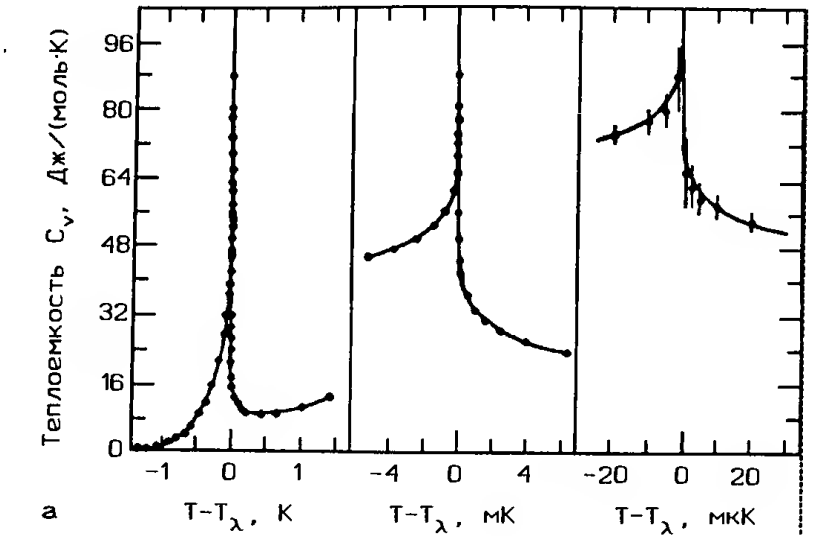


Рис. 1.2. Графік залежності теплоємності ^{4}He від температури, поблизу λ - точки.

Гелій являється дуже чудовою системою для вивчення властивостей з дуже високим температурним дозволом поблизу критичної температури завдяки його надзвичайної частоти (всі інші речовини «замерзають»), звідси різкість переходу. З-за характерної форми максимуму теплоємності використовується термін λ – перехід, що позначає надплинний перехід в ^{4}He.

Властивість надплинності, що спостерігається в He II, при рідкому стані не можна пояснити лише за допомогою звичайних уявлень. Тому що вони входять до складу звичайних молекулярних систем, в яких велику роль грають теплові рухи. Коли енергія цих теплових рухів є дуже малою, то тільки

тоді існує рідкий гелій при низьких температурах. В таких умовах можуть відбуватися різні явища, але уже при більш високих температурах вони не спостерігатимуться. Ця властивість надплинності, як і багато інших явищ, відбувається при температурах, близьких до абсолютного нуля, які супроводжуються квантовим ефектом. Ця думка була дана в 1941р. Л. Д. Ландау [2].

Але у зв'язку з тим, що виникло багато питань щодо властивостей ізотопів гелію, то цю думку переглядали не один раз, так як теорія не давала чітку відповідь. Це все викликало дуже велику зацікавленість і стало причиною багато яких експериментальних досліджень. Проблема рідкого гелію, отримала великого значення , тому що займає одне з центральних місць у фізиці низьких температур.

З часом було виявлено, що окрім ^{4}He, існує тільки один ізотоп гелію - ^{3}He, але він дуже мало розповсюджений, через це питання проблеми рідкого гелію ускладнювалось. Експериментальні дослідження показали, що рішення проблеми про властивості ізотопів гелію тісно пов'язано з можливістю отримання в чистому вигляді ^{3}He. Але як виявилось унікальними є властивості не тільки чистих ^{4}He і ^{3}He, а і їх розчинів.

У зв'язку з тим, що і досі не вирішено проблему існування при наднизьких температурах розчинів, домішкові збудження зазнають фермівського виродження, тоді коли ^{3}He переходить в надплинний стан, то зацікавленість до системи ^{3}He - ^{4}He залишається актуальною. Розчини в яких одночасно є бозевські та фермівські збудження, називаються квантові системи. Через це вироджені розчини утворюють тип квантових рідин – фермі-бозе-рідини.

Надплинна компонента – в'язкістю не володіє і тому вільно протікає через вузькі щілини та капіляри. Теплоємність і ентропія системи збігаються з теплоємністю та ентропією збуджень – величинами, які можна обчислити , якщо відомий енергетичний спектр збуджень. Ландау підтримав припущення Л. Тиси, Не II складається з двох компонент: нормальною (n) та надплинною

(s), кожна з яких характеризується своєю щільністю (так, що повна щільність рідини дорівнює $\rho=\rho_n+\rho_s$) і своїми гідродинамічними швидкостями $\bar{\upsilon}_n$ та $\bar{\upsilon}_s$. Повна щільність потоку імпульсу рідини дорівнює $j= \rho_n \bar{\upsilon}_n +\rho_s \bar{\upsilon}_s$.

Щільність ρ_n нормальної компоненти прагне до нуля при T=0, коли гелій стає повністю надтекучим. Щільність ρs надплинної компоненти йде в нуль при $T=T_\lambda$, коли весь гелій стає «нормальним». На «рис. 1.3.» показано графік відношення цих двох компонент відносно температури.

Нормальна компонента при температурах, не дуже близьких до T_λ, являє собою джерело квазічастинок двох типів – фононів (квантів звуку) та ротонів (квантів короткохвильових збуджень, що володіють більшою, ніж у фононів, енергією). Цей стан, близький до основного, характеризується числами та енергіями збуджених фононів і ротонів, що накладаються на основний стан.

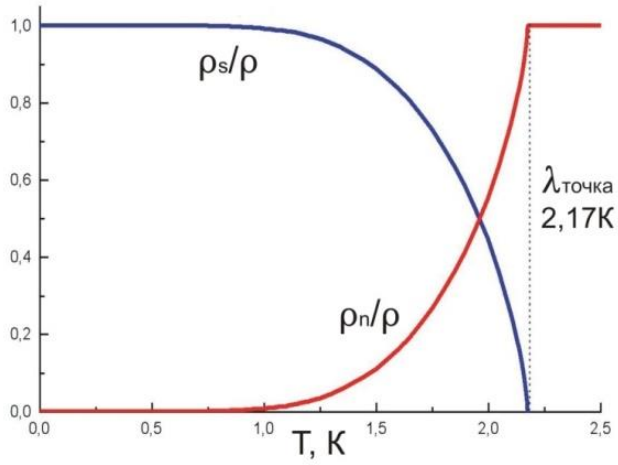


Рис. 1.3. Відношення густини нормальної компоненти та надплинної.

Дворідинна модель надплинного гелію розкриває багато інших ефектів в ^{4}He [3]. Існування надплинної плівки на стінках посудини, завдяки якій вирівнюються рівні He II в судинах, «рис. 1.4.».

З мікроскопічної точки зору поява надплинності в рідині, що складається з атомів з цілим спіном (бозонів), наприклад атомів ^{4}He, пов’язане з переходом

при $T=T_\lambda$ значного числа атомів в стан з нульовим імпульсом. Це явище називається Бозе – Ейнштейна конденсацією, а сукупність нових атомів, що перейшли в цей стан Бозе – конденсатом. Існування в He II атомів, що володіють різним характером руху, - атомів конденсату і атомів, що не увійшли в конденсат, - призводить до двох рідинної гідродинаміки Ландау.

Поширення звуку є рух областей ущільнення і розрідження зі швидкістю звуку в нерухомій рідині. Зміна щільності передається від одних частинок рідини до інших, без перемішування разом із звуковою хвилею.

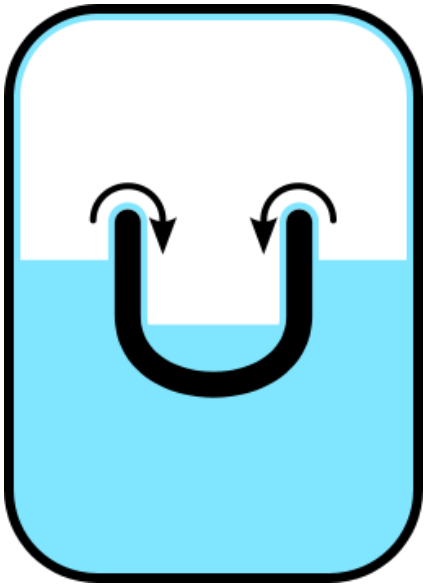


Рис. 1.4. Аномальний плин ^{4}He.

У рідкому He II тепловий рух відбувається завдяки присутності звукових хвиль. В результаті перенос маси рідини відсутній, тому що енергія хвиль, яка поширюється однакова. Коли відбувається переважний напрямок поширення звукової хвилі, то це приведе до перенесення маси рідини. Якщо тіло рухається рівномірно з швидкістю до звуку в рідині, то воно випромінювати звук не може.

Надплинність повинна спостерігатися при швидкостях менше деякої критичної. Коли відбувається зрив надплинності, то при великих швидкостях течії випромінювання звуку можливо.

Експерименти доказують, що ця критична швидкість існує. Якщо брати до уваги, що He II складається з двох компонент, здатних переміщатися незалежно одна від одної, то рух (надплинної) не буде супроводжуватися тертям, а при русі (нормальної) тертя буде виникати. В результаті сума мас обох компонент буде дорівнювати повній масі рідини.

Є два види руху, кожний з них супроводжується перенесенням своєї маси: один має властивість надплинності, інший супроводжується тертям і зв'язаний з перенесенням звукових хвиль. Атоми гелію беруть участь в цих рухах, так як звук – колективне явище. Коли відбувається підвищення температури, то енергія звукових хвиль зростає і зростає маса, яка має відношення до руху нормальної компоненти. Потім надплинний рух зникає, тому що не буде маси, яка переноситься ним, та He II перейде в He I, який поводиться, як звичайна речовина.

Характеристика ^{3}He досить цікава тим, що його властивості легко описуються теорією для фермі-рідини Ландау при $T \leq 0{,}1$К. При падінні температури $T = T_c$ в рідкому ^{3}He відбувається перехід II роду в надплинний стан.

1.2 Число Рейнольдса

Характер руху рідини – ламінарний або турбулентний – залежить від щільності рідини ρ, її в'язкості η, швидкості течії $\bar{\upsilon}$, діаметра труби d,по якій тече рідина. Виявляється, що деяка комбінація цих величин – один безрозмірний параметр – може визначати умови переходу ламінарної течії рідини в турбулентний [4]. Таким параметром є число Рейнольдса (*Re)*:

$$Re = (\rho \cdot u \cdot l)/\eta \qquad (1.1)$$

ρ — густина рідини або газу, u — характеристична швидкість, l — характеристична довжина або розмір, η — динамічна в'язкість.

Коли число Рейнольдса не перевищує деякого критичного значення $Re_{кр}$, течія рідини ламінарна. Якщо ж $Re > Re_{кр}$, то в потоці рідини виникають завихрення – її течія стає турбулентна.

Значення критичного числа Рейнольдса можна визначити експериментально, «рис. 1.5.». Уявимо, що по гладкій циліндричній трубі протікає вода з регульованою та вимірюваною швидкістю $\bar{\upsilon}$, яка представляє собою середню по перерізу труби швидкість течії. Щільність води, її в’язкість і діаметр труби відомі. Припустимо, що труба прозора і перехід течії рідини з ламінарного можна визначити візуально. Поступово збільшуючи швидкість течії, відзначимо її значення $\bar{\upsilon}_{кр}$, при якому в потоці рідини починає проявлятися турбулентність. Підставивши це значення $\bar{\upsilon}_{кр}$, в формулу (1.1), то отримаємо величину критичного числа Рейнольдса. Для гладких труб $Re_{кр}$ =2300.

Якщо $Re_{кр}$ відомо, то стає можливим для будь-якої рідини і різних умов її перебігу передбачити, чи буде її потік ламінарним або турбулентним.

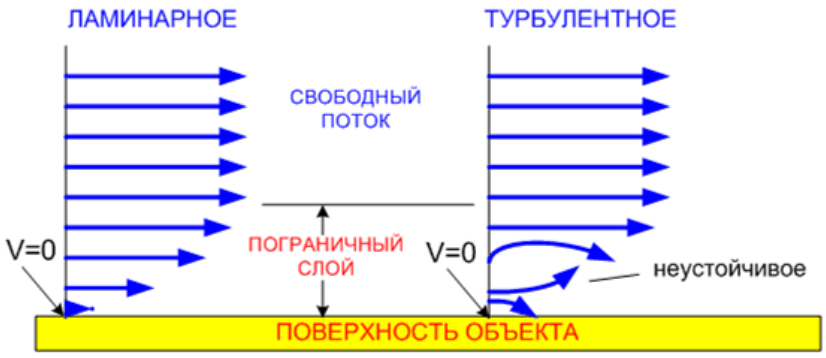


Рис. 1.5. Перехід від ламінарної течії до турбулентної.

Режим течії в динамічному прикордонному шарі залежить від числа Рейнольдса і може бути ламінарним або турбулентним. При турбулентному режимі в прикордонному шарі на деякий усереднений рух частинок рідини в

напрямку основного потоку накладається хаотичний, пульсаційний рух окремих рідких конгломератів. В результаті інтенсивність перенесення кількості руху, а також процесів тепло - і масо переносу різко збільшуються, що призводить до зростання коефіцієнта поверхневого тертя, тепло - і масообміну. Значення критичного числа Рейнольдса, при якому відбувається перехід в прикордонному шарі ламінарної течії в турбулентний стан, залежить від ступеня шорсткості обтічної поверхні, рівня турбулентності зовнішнього потоку. При цьому перехід ламінарного режиму течії в турбулентний зі зростанням *Re* відбувається в прикордонному шарі не раптово, а є перехідна область, де поперемінно чергуються ламінарний та турбулентний режими.

1.3. Ламінарний та турбулентний режим рідини.

1.3.1. Ламінарний режим

Початок переходу від ламінарної течії до турбулентної зазвичай пов’язують з появою бурхливих процесів у вигляді турбулентних плям і низькочастотних пульсацій великої амплітуди. Однак в даний час стало абсолютно очевидним, що приводить в кінцевому рахунку до руйнування ламінарної течії (принаймні в разі малої інтенсивності зовнішніх збурень), бере початок набагато раніше, а саме в трансформації зовнішніх збурень різної природи в зовнішньому потоці в хвилі прикордонного шарі, що відбувається на нерівностях обтічної поверхні (уступи, шорсткості).

Таким чином, процес переходу ламінарного прикордонного шару в турбулентний стан при малій інтенсивності зовнішніх збурень складається з трьох умовно поділюваних етапів: генерація хвиль прикордонного шару, їх посилення по законам лінійної теорії і нелінійне руйнування ламінарного режиму течії, «рис. 1.6.».

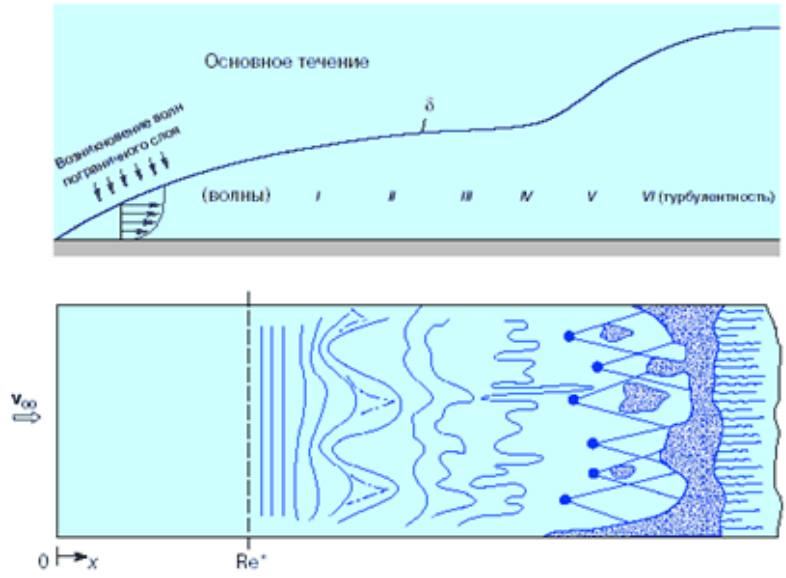


Рис. 1.6. схема основних стадій процесу переходу до турбулентності в прикордонному шарі: I - стадія нестійкості збурень малих амплітуд (хвиль – Толлміна - Шлихтинга), II - стадія тривимірного розвитку хвиль нестійкості кінцевих амплітуд (1 - структур), III - область розвитку поздовжніх вихрових утворень, IV – стадія концентрації завихрення та верств сильного зсуву, V – область виникнення турбулентних плям, VI – стадія розвитку та взаємодії турбулентних плям.

Як видно, перехід ламінарної течії в турбулентний в прикордонному шарі є безперервним процесом, починаючи від збудження малих збурень і закінчуючи встановленням розвиненої турбулентної течії зі своїм характерним профілем середньої швидкості і внутрішньою структурою.

Ламінарний режим рідини, спостерігається, наприклад, при досить повільній течії рідини в трубі. Зі збільшенням швидкості руху ламінарний режим в певний момент переходить в турбулентний режим, виникають вихори, відбувається інтенсивне перемішування шарів рідини, опір рідини змінюється «рис. 1.7.».

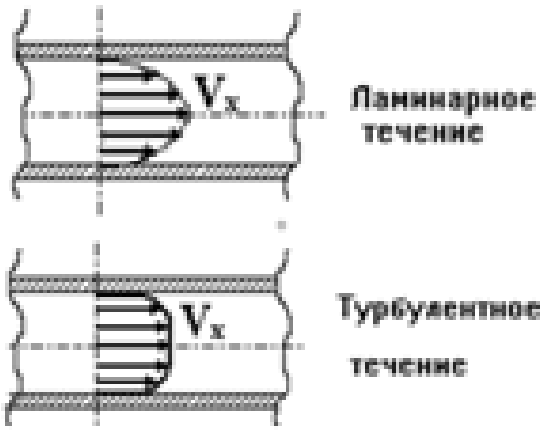


Рис. 1.7. Розподіл швидкостей руху рідини в перерізі труби.

Сили опору тертя для ламінарного та турбулентного прикордонних шарів істотно відрізняються один від одного. При ламінарному режимі руху опір тертя обумовлено в’язкістю та є пропорційним першому ступеню швидкості руху. При зменшенні в’язкості прикордонного шару починають переважати сили інерції, пропорційні квадрату швидкості - виникає режим турбулентного руху [5].

Під поняттям переходу від ламінарного до турбулентного режиму, розуміються власне процес розпаду ламінарного режиму і формування турбулентного режиму. В даний час стало очевидним, що довга послідовність фізичних процесів, що приводить в кінцевому підсумку до руйнування ламінарного режиму, бере початок в трансформації зовнішніх збурень (нерівностей траси, структури снігу, зусиль відштовхування спортсмена) в хвилі прикордонного шару, або в їх генерації в самому прикордонному шарі.

1.3.2 Турбулентний режим рідини

Коли відбувається пульсація тисків, швидкості та перемішування рідини, цей процес називають турбулентним [6, 7, 8].

Якщо в турбулентному режимі вибрати довільну точку та дослідити швидкості і траєкторії частинок, що саме проходять через цю точку, то отримаємо: швидкість буде коливатись біля усередненого $\bar{\upsilon}_{ср}$ за часом

значення, яке є постійним, а траєкторії частинок, не звертаючи уваги на прямолінійність потоку, є кривими лініями різної форми «рис. 1.8.».

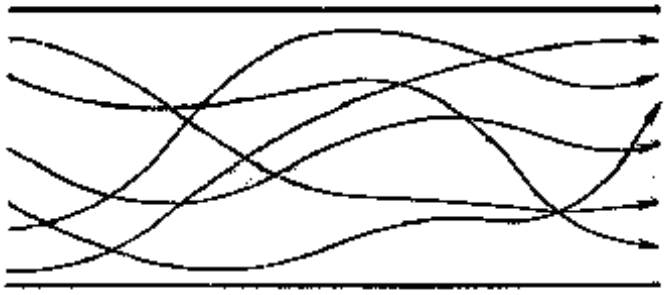


Рис. 1.8. Турбулентний рух рідини у трубі.

Так як турбулентний режим це хаотичний рух рідини, то значення швидкостей, тисків, траєкторії руху змінюються за часом. Але на практиці досить часто зустрічалися випадки, коли усереднені за часом значення швидкостей, тисків та повні витрати потоку не змінювалися за часом, тобто його можна вважати усталеним протягом якогось часу.

В такому русі також можна зустрічати закономірності. Існує прилад, який допомагає фіксувати зміну швидкості в точці виміру, термогідрометр. Коли вибрати інтервал часу для достатньої тривалості, то коливання швидкості спостерігатиметься близько деякого рівня і цей рівень буде постійним при виборі інших інтервалів часу. Ця величина швидкості в даний момент часу та в даній точці називається миттєва швидкість, «рис. 1.9.» [9].

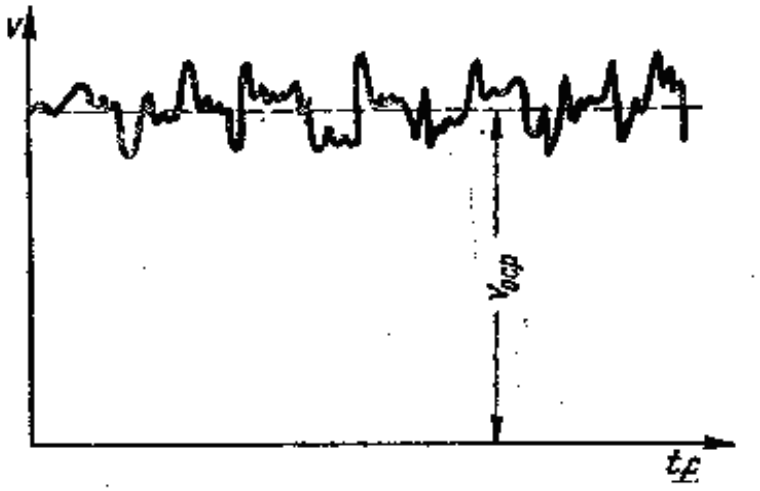


Рис. 1.9. Залежність швидкості від часу у деякій точці турбулентної течії.

Щоб провести інтегрування кривої швидкостей, обравши певний інтервал часу, а потім знайти середню величину, отримаємо усереднену швидкість:

$$\bar{u} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(t)dt \qquad (1.2)$$

В результаті між різницею миттєвої та усередненої швидкостями отримаємо – швидкість пульсацій u:

$$u' = u - \bar{u} \qquad (1.3)$$

Коли величини осереднених швидкостей залишаються постійними в різні інтервали часу - сталий турбулентний рух. А коли вони не постійні в часі - несталий рух. Завдяки пульсацій, в рідині відбувається перемішування.

Взагалі турбулентність виникає тоді, коли сусідні області середовища проникають один в одного або разом слідують, при різких перепадах тиску чи наявності сили тяжіння. Завдяки вимушеній силі вона буде виникати. Дуже часто зовнішня сила та сила тяжіння діють одночасно.

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Метод кварцового камертона

При дослідженні властивостей рідких ^{3}He-^{4}He і також їх розчинів широке застосування знаходять кварцові камертони, «рис. 2.1.» [10, 11].

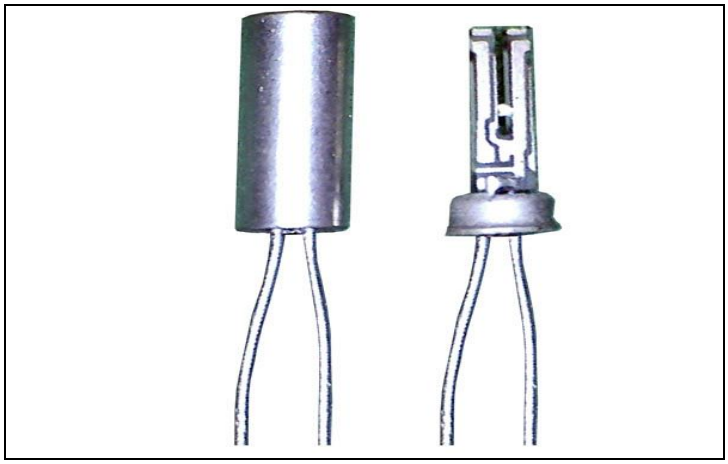


Рис. 2.1. Кварцовий камертон в металевій оболонці і без неї.

Особливості роботи кварцових камертонів в чистих ^{3}He-^{4}He, а також в слабких розчинах ^{3}He в ^{4}He раніше досліджені в [12]. Параметри резонатора залежать від властивостей навколишнього середовища, в основному від в'язкості η і щільності ρ. Ширина резонансу пропорційна величині $\rho\delta$, де $\delta=\sqrt{2\eta/\rho\omega}$ глибина проникнення в'язкої хвилі, а зрушення резонансної частоти залежить від приєднаної маси рідини, її щільності, геометрії резонатора і глибини проникнення. Температурні залежності резонансних параметрів, ширини резонансних кривих, для кварцових камертонів в вакуумі, що належать до однієї і тієї ж серії, можуть помітно відрізнятися один від одного. З цієї причини необхідно проводити калібрування кожного конкретного кварцового камертона, після чого його можна використовувати

як датчик тиску або вторинний термометр. Сильна залежність в'язкості чистого ^{3}He і розчинів ^{3}He в ^{4}He від температури нижче 100 мК забезпечує достатню чутливість такого термометра.

Для експериментального дослідження переходу від ламінарного режиму течії рідини до турбулентного в надплинних розчинах ^{3}He в ^{4}He був використаний метод вібруючого п'єзоелектричного кварцового камертона, поміщеного в рідину. Були використані камертони промислового виробництва вживані як стандарт частоти f=32768Гц з геометричними розмірами: висота ніжок L=3,79мм товщина H=0,59мм, ширина W=0,3мм і відстань між ніжками D=0,3мм. У експериментах використовувалися відкриті камертони (тобто їх корпуси були повністю видалені). Камертони поміщали в мідний циліндричний осередок з внутрішнім діаметром 11,8мм, який мав тепловий контакт з холодною плитою криостата випару з ^{3}He. Температуру досліджуваної рідини вимірювали за допомогою термометра опору RuO2, розташованого усередині осередку. Електрична схема, використовувана для вимірювання зображена «рис. 2.2.». В якості скануючого генератора були використані або генератор синусоїдального сигналу Wavetek A29, або Functional Generator MCP. Для отримання сигналу малої амплітуди на виході генератора встановлювалися зразкові аттенюаторы: 20, 40 або 60 дБ. Для отримання високих напруг збудження камертона, необхідної для виміру резонансних кривих в турбулентному режимі, до виходу генератора додавався спеціально виготовлений підсилювач і трансформатор, що підвищує. Таким чином, напругу збудження камертона в експерименті можна було змінювати від 10^{-3} до $5 \cdot 10^3$ В peak - to - peak. Зниження напруги, на еталонному опорі 1кОм посилювалося, за допомогою двохканального синхронного підсилювача Lock - in Analizator 5208.

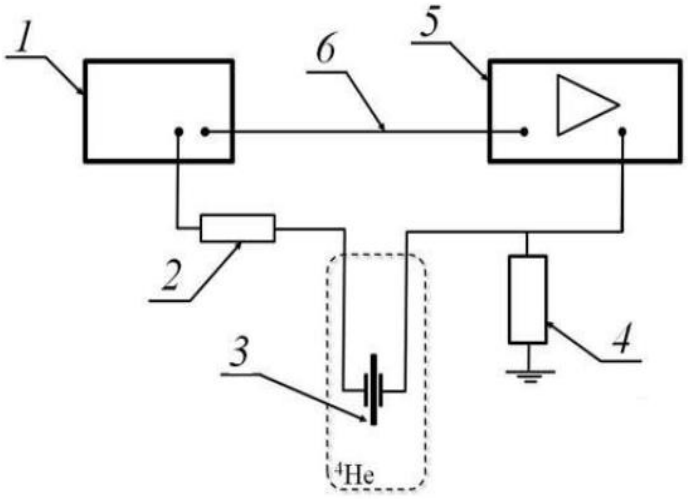


Рис. 2.2. Принципова схема підключення кварцових камертонів для проведення вимірювань. 1 – генератор, 2 – аттенюатор, 3 – підсилювач, 4 – камертон в осередку, 5 – еталонний опір, 6 – синхронний підсилювач, 7– опорний сигнал.

Первинними даними методу дослідження рідини за допомогою кварцового камертону є амплітудно-частотна залежність (АЧЗ). Камертон збуджували змінною напругою, повільно змінюючи частоту і проходячи через резонанс камертона. Вимірюваною величиною відгуку камертона було середньоквадратичне значення струму *I*, який виникав внаслідок п'єзоелектричого ефекту. Амплітуду швидкості відхилення ніжки камертона визначали за допомогою співвідношення $\bar{v} = I/a$, де *a* – п’єзоелектричний коефіцієнт. Для визначення величини *a* на початку експерименту були проведені вимірювання АЧХ камертона в вакуумі при температурі ~ 1,5К та невеликих збуджуючих напруженнях (до 0,1В). Значення постійної *a* дозволяло перейти від електричних параметрів системи, амплітуди сигналу в резонансі та збуджуючої напруги, до фізичних характеристик, амплітуди швидкості коливання ніжки камертона $\bar{v}$ та амплітуди збуджуючої сили *F*, $F = aU/2$, *U*- середньоквадратичне значення напруги.

2.2 Рефрижератор випаровування для отримання наднизьких температур

В процесі даної роботи нам потрібно було проводити досліди з надплинним гелієм при температурах нижчих за 1 К. Для цього було вирішено використати рефрижератор випаровування. Суть роботи такого рефрижератора полягає у відкачуванні парової фази над поверхнею рідини, таким чином ми забираємо з рідини найбільш енергетичні частинки, що в свою чергу призводить до зменшення середньої енергії рідини, а отже і її температури. Зовнішній вид рефрижератора випаровування ^{3}He безперервної дії з зовнішнім відкачуванням показано на «рис. 2.3».

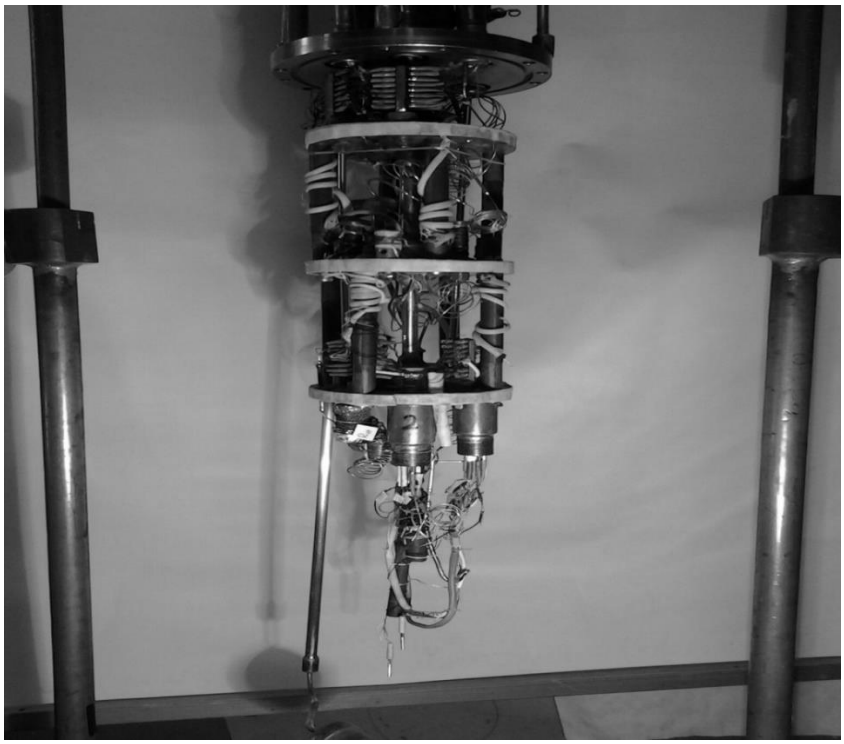


Рис. 2.3. Рефрижератор випаровування ^{3}He безперервної дії з зовнішнім відкачуванням.

Він має камеру випаровування ^{4}He (одноградусна камера), за допомогою якої могла здійснюватися безперервна робота рефрижератора в області температур 1,5 – 4 К. Робота в області температур 0,4 – 1,5 К здійснювалась за допомогою камери випаровування ^{3}He, яка відкачувалась герметичним

насосом НВГ – 2. Цей насос, при продуктивності 0,3л/с створював залишковий тиск $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., що дозволяло отримати температуру ≈ 0,4 К при холодопродуктивності 0,2 мВт.

Однак суттєвим недоліком цієї конструкції є те, що основна частина теплообмінної поверхні пластин, що контактує з рідким ^{3}He, внаслідок його незадовільній теплопровідності виявляється блокованою і практично не бере участі в процесі теплопередачі, так що весь тепловий потік знімається тільки з малих дільниць висоти пластин, розташованих безпосередньо під рівнем рідини в камері в шарі рідини глибиною близько 1мм. Внаслідок цього холодопродуктивність рефрижераторів подібного типу при температурах нижче 0,5 К не перевищує 10^{-4}-10^{-5} Вт.

2.3 Експериментальна установка

Експериментальна установка складається з наступних ключових частин:

1) Основна частина, що складається з послідовно занурених один в один криостатів, які утворюють три основні температурні рівні.

- Перший рівень, це відкритий азотний дьюар, який забезпечує попереднє охолодження системи до температури приблизно 80К та становить основний тепловий екран, який має приймати на себе зовнішній тепловий вплив.
- Другий рівень, це дюар для рідкого ^{4}He, який герметично поєднаний з системою повернення газоподібного ^{4}He до газгольдеру. Цей дьюар необхідний, по-перше, для охолодження системи до температури ~ 4,2 К, по-друге, як ванна, звідки рідкий ^{4}He забирається до камери Уітлі, по-третє, в якості додаткового теплового екрану.
- Третій рівень, це вакуумна сорочка, в якій знаходиться низькотемпературна частина, детальне описання якої буде приведене нижче.

2) Частина, що відповідає за відкачку ^{4}He з камери Уітлі та повернення газоподібного ^{4}He до газгольдеру. Вона складається з герметичного насосу 2НВР-5Д та системи комунікацій.

3) Частина, що відповідає за збір та зберігання розчинів ^{3}He-^{4}He, з якими проводились дослідження. Складається з 4 адсорбційних насосів та балонів для зберігання газоподібних розчинів.

4) Частина, що відповідає за утворення вакууму в системах комунікацій та у вакуумній сорочці. Складається з двох негерметичних форвакуумних насосів.

5) Частина, що відповідає за відкачку та циркуляцію ^{3}He. Складається з системи комунікацій та двох герметичних насосів НВГ-2 і 2НВР-5Д.

6) Частина, що складається з трьох азотних пасток, котрі забезпечують чистоту газів, що циркулюють у системі. У випадку проникнення у систему забруднення або повітря, вони мають осідати в цих пастках, так як можуть закупорити тонкі капіляри та дроселі.

7) Блок управління експериментальної установки, що складається з систем комунікацій, вентилів різних видів та манометрів для спостереження тиску у різних частинах установки. Дана частина відповідає за управління та контроль окремих частин установки під час її роботи.

Низькотемпературна частина рефрижератора знаходиться у вакуумі всередині вакуумної сорочки та складається з частин котрі відповідно зазначені на «рис. 2.4».

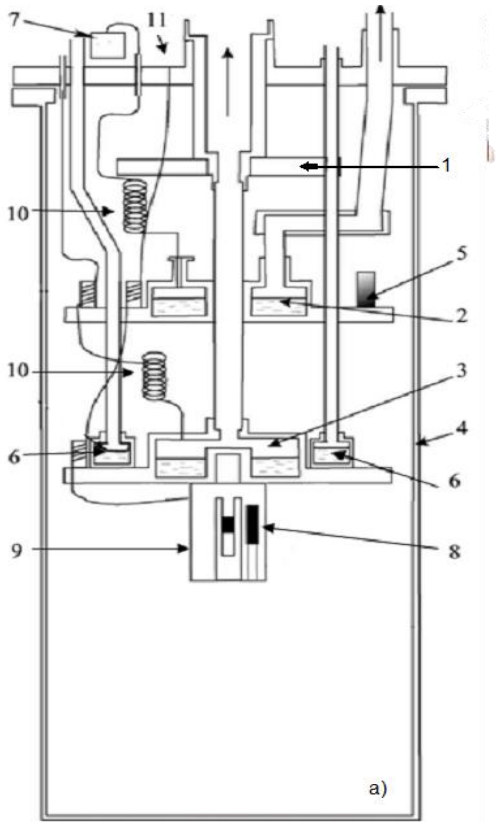


Рис. 2.4. Низькотемпературна частина експериментальної установки.
а) принципова схема

1. Теплова плита “4,2 К”, це мідна плита, котра має тепловий контакт з ванною з рідким ^{4}He, за рахунок чого має температуру 4,2 К. Вона забезпечує попереднє охолодження всіх систем, котрі входять у низькотемпературну частину установки до температури 4,2 К.
2. Камера Уітлі, з якої відбувається відкачка ^{4}He, має форму кільця та розташована на трубі відкачки ^{3}He. Камеру Уітлі також називають камерою випаровування ^{4}He та одноградусною камерою, через те, що за рахунок відкачки ^{4}He в ній підтримується температура ~ 1,3 К, яка через тепловий контакт передається тепловій плиті “1К”. Камера Уітлі і теплова плита 1К використовуються для конденсації ^{3}He у камеру відкачки ^{3}He.
3. Камера відкачки ^{3}He має об’єм 58 см^3 та забезпечує температуру ~ 0,3 К, яка передається плиті “0,3 К”, на яку закріплюється експериментальна комірка.

4. Вакуумна сорочка - це металевий циліндричний контейнер, який забезпечує герметичність низькотемпературної частини та дозволяє утримувати всередині високий вакуум.
5. Полімерний адсорбент “СКН” знаходиться на плиті “1 К”. Він необхідний для утворення високого вакууму та поглинання теплообмінного газу після досягнення температури ~ 4,2 К. Теплообмінний газ ^{4}He необхідний для того, щоб охолодити низькотемпературну частину до температури ванни з ^{4}He ~ 4,2 К, однак, для подальшого охолодження у вакуумній сорочці має бути високий вакуум. Тому після досягнення в низькотемпературній частині температури рідкого ^{4}He, адсорбент охолоджується і поглинає теплообмінний газ утворюючи високий вакуум. Однак, інколи теплообмінний газ поглинається адсорбентом раніше ніж всі системи встигають охолонути до необхідної температури. Для того щоб було можна відновити теплообмін на адсорбент намотують котушку, яка при необхідності нагріває адсорбент, що призводить до звільнення теплообмінного газу.
6. Конденсаційні термометри ^{3}He та ^{4}He знаходяться на тепловій плиті “0,3К” та дозволяють вимірювати температури більші за 0,6К. Вони працюють за рахунок виміру пружності пари над рідиною за допомогою ртутних манометрів, після чого на лінії насиченого пару визначається температура. Конденсаційні термометри необхідні для безпосереднього виміру температури та калібровки інших термометрів.
7. Фільтр зі спеченого мідного порошку, що фільтрує рідкий ^{4}He, який протікає у камеру Уітлі. Фільтр необхідний для того, щоб не допустити закупорення капіляру заповнення макроскопічними частинками, які можуть знаходитись у ванній з рідким ^{4}He.
8. Термометри опору, що використовуються для виміру температури у різних частинах експериментальної установки. В установці використовується вугільний (Allen Bradley) та товсто плівкові RuO_2 термометри опору, які мають велику чутливість при температурах нижчих за 2 К, невеликі розміри

та малу інерційність вимірів. Вимірювання електроопору проводиться за дротовою схемою, за допомогою мостів опору.

9. Експериментальна комірка являє собою мідний циліндр з внутрішнім діаметром 11,8 мм і об'ємом 1,64 $см^3$, котрий приєднаний до теплової плити "0,3К" та має з нею безпосередній тепловий контакт. Всередині комірки знаходяться камертон та два термометри опору RuO_2, «рис. 2.5.». Температуру в комірці можна налаштовувати та стабілізувати, використовуючи систему стабілізації з відносною точністю стабілізації при заданій температурі ~ 10^{-3}. Система складається з термометра та нагрівача, що знаходяться на тепловій плиті "0,3 К" та підключені до вимірювального пристрою, котрий в свою чергу підключений до комп'ютера та керується спеціальною програмою. Така система стабілізації температури дозволяє проводити дослідження при фіксованій температурі або при температурному дрейфі.

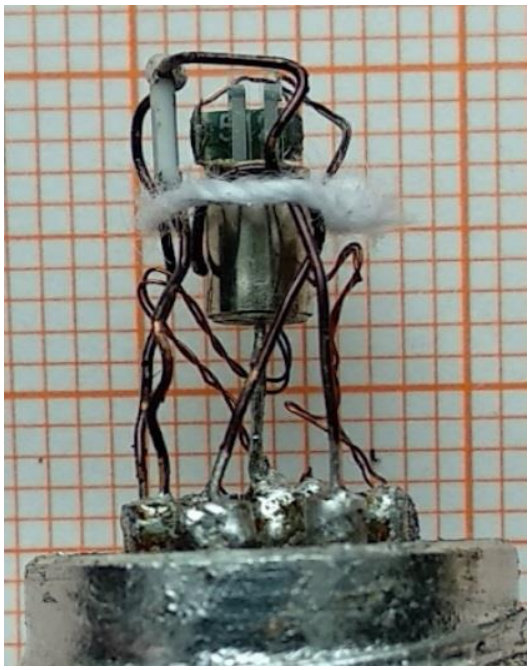


Рис. 2.5. Фотографія внутрішнього оснащення експериментальної комірки.

10. Дроселі камер відкачки ^{3}He та ^{4}He, необхідні для підтримки необхідної швидкості заповнення кріогенною рідиною відповідні камери відкачки.
11. Лінія конденсації досліджуваної рідини, що проходить через всі теплові плити для того, щоб рідина, яка потрапляє до експериментальної комірки, охолола та прийняла необхідну температуру.

2.4. Система вимірювання температури

Експеримент було проведено в області температур 0,4 – 2,5 К. Для вимірювання такого інтервалу температур потрібні були термометри різного типу. Досить зручно використовувати вугільні термометри опору, проте вони вимагають калібрування. Для калібрування в області температур від 0,6К до 1,8 К використовувався конденсаційний термометр ^{3}He (заснований на вимірюванні пружності пари над рідким ^{3}He), а при температурах $T > 1{,}75$ К - конденсаційний термометр ^{4}He. В інтервалі температур, де пружність пара ^{3}He дуже мала (0,4 - 0,6 К), використовувався особливий тип термометра - термометр, що працює на залежності тиску плавлення ^{3}He від температури.

РОЗДІЛ 3
ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Для визначення сили турбулентного опору і коефіцієнта опору в розчинах ^{3}He в ^{4}He були використані експериментальні результати залежностей амплітуди швидкості коливання ніжок камертона від збуджуючої сили. При зміні напруги збудження на резонансній частоті, за допомогою зразкового опору вимірювали результуючий струм в електричному ланцюзі камертона.

Для зв’язку виміряних електричних властивостей камертона з його механічними властивостями були використані співвідношення, використовуванні також і іншими науковими групами [12]. Струм I, створюваний рухом камертона, пов'язаний зі швидкістю $\bar{\upsilon}$ кінчика зубців через п’єзоелектричну константу камертона a:

$$I = a\upsilon. \tag{3.1}$$

Постійна камертона також визначає співвідношення між рухаючою силою F та прикладеною напругою U:

$$F = aU/2\ . \tag{3.2}$$

Це слідує із міркувань енергії. Добуток сили та швидкості є поглинаючою потужністю, яка дорівнює добутку прилягаючої напруги та сили. Виникає два коефіцієнта, оскільки вилка має два зубця, які переміщуються в протифазі.

3.1. Внесок турбулентної сили в опір потоку

Експериментальні результати залежностей амплітуди швидкості коливання камертона від збуджуючої сили в ^{4}He, а також розчинах з концентрацією 5% і 15% ^{3}He в ^{4}He, отримані в області температур від 355 до 1905мК показані на «рис. 3.1.».

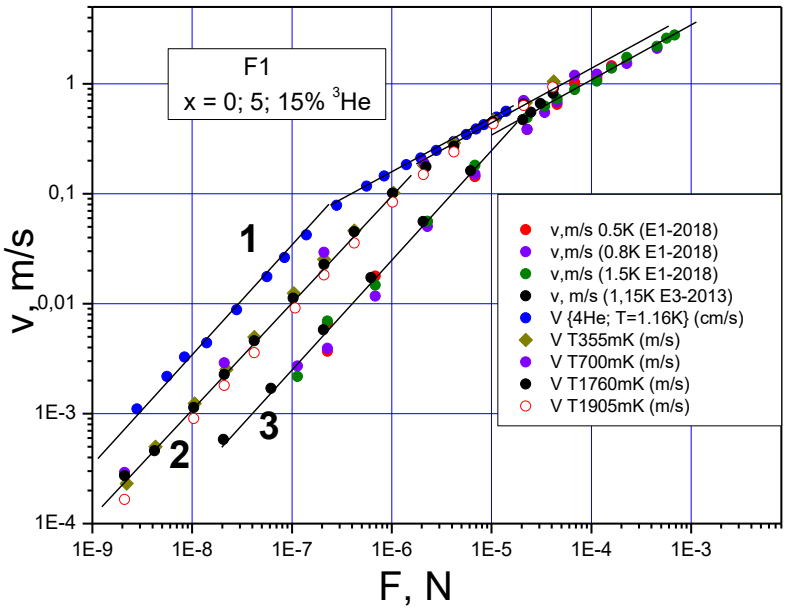


Рис. 3.1. Залежність амплітуди швидкості коливання камертона від збуджуючої сили : 1 - в ^{4}He при T = 1,16К, 2 - в 5% розчині ^{3}He при T = 1,15К, 3 - 15% розчині ^{3}He при T: ● - 0,5К; ▲ - 0,8К; ◊ - 1,15К; ■ - 1,5К.

Добре видно, що при малих амплітудах швидкості залежність сили – швидкість дуже близька до лінійної, $\bar{\upsilon} \sim F$. Використовуючи ці експериментальні залежності, можна визначити відношення $F/\bar{\upsilon}$, яке пропорційно ширині Δf лінії резонансу та визначає коефіцієнт затухання при ламінарному режимі течії рідини. Як було показано раніше [12], при температурах вище 1 К це затухання можна описати з точки зору вузького затухання нормальної компоненти розчину ^{3}He в ^{4}He.

У міру збільшення рушійної сили форма лоренцевої резонансної кривої камертона змінюється, резонансна частота зміщується, а сама лінія розширяється. При цьому залежність $\upsilon(F)$ набуває вигляду $v^2 \sim F$. Така залежність відповідає появі, виникає в результаті утворення вихорів і

переходом в турбулентний режим течії рідини [6]. Подібна поведінка раніше спостерігалася для вібруючих камертонів в надплинному ^{4}He [13,14,].

Для визначення турбулентної сили опору, можна продовжити лінійну залежність F/$\bar{\upsilon}$ та, для заданої швидкості, із прилягаючої сили відняти силу, пропорційну швидкості, відповідну ламінарному режиму:

$$F_{turb}(v) = F(v) - \gamma v, \tag{3.3}$$

де γ визначається по F/υ при малих швидкостях. Отримані дані для різних температур і розчинів з концентрацією 5% та 15% ^{3}He в ^{4}He відображені на «рис. 3.2.». Добре видно, що з ростом амплітуди швидкості $\bar{\upsilon}$ всі точки, з невеликим розкидом, наближаються до однієї лінії - $F \sim v^2$. Це означає, що сила турбулентного опору в концентрованих розчинах ^{3}He в ^{4}He в області температур 0,35 – 1,5 К практично не залежить від температури та концентрації і описується залежністю, характерною для турбулентної течії рідини $F \sim v^2$. Раніше подібний результат був отриманий в роботі [13] при дослідженні чистого ^{4}He, «рис. 3.3.».

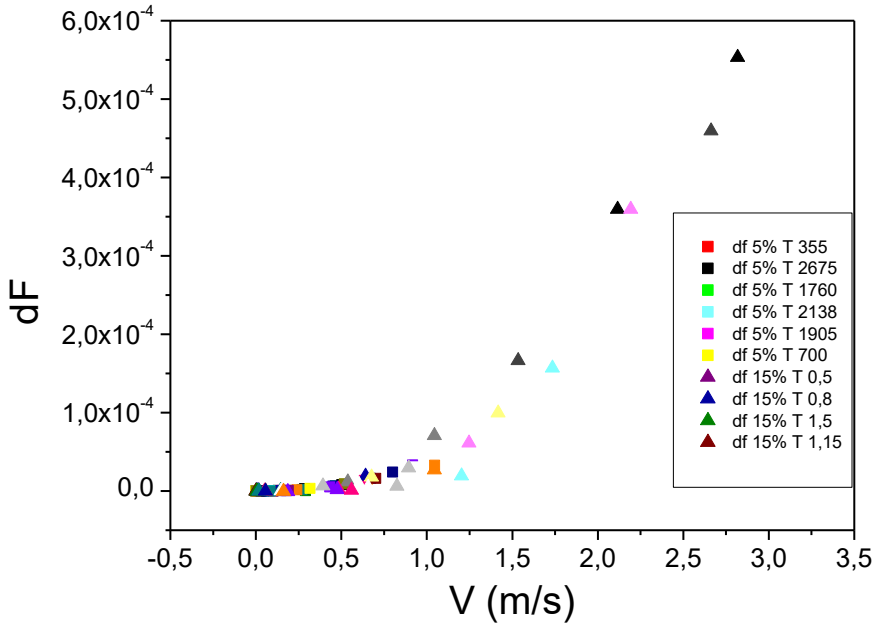


Рис. 3.2. Залежність сили турбулентного опору від швидкості: ■ - 5% розчин ^{3}He; ▲ - 15% розчин ^{3}He при даних температурах.

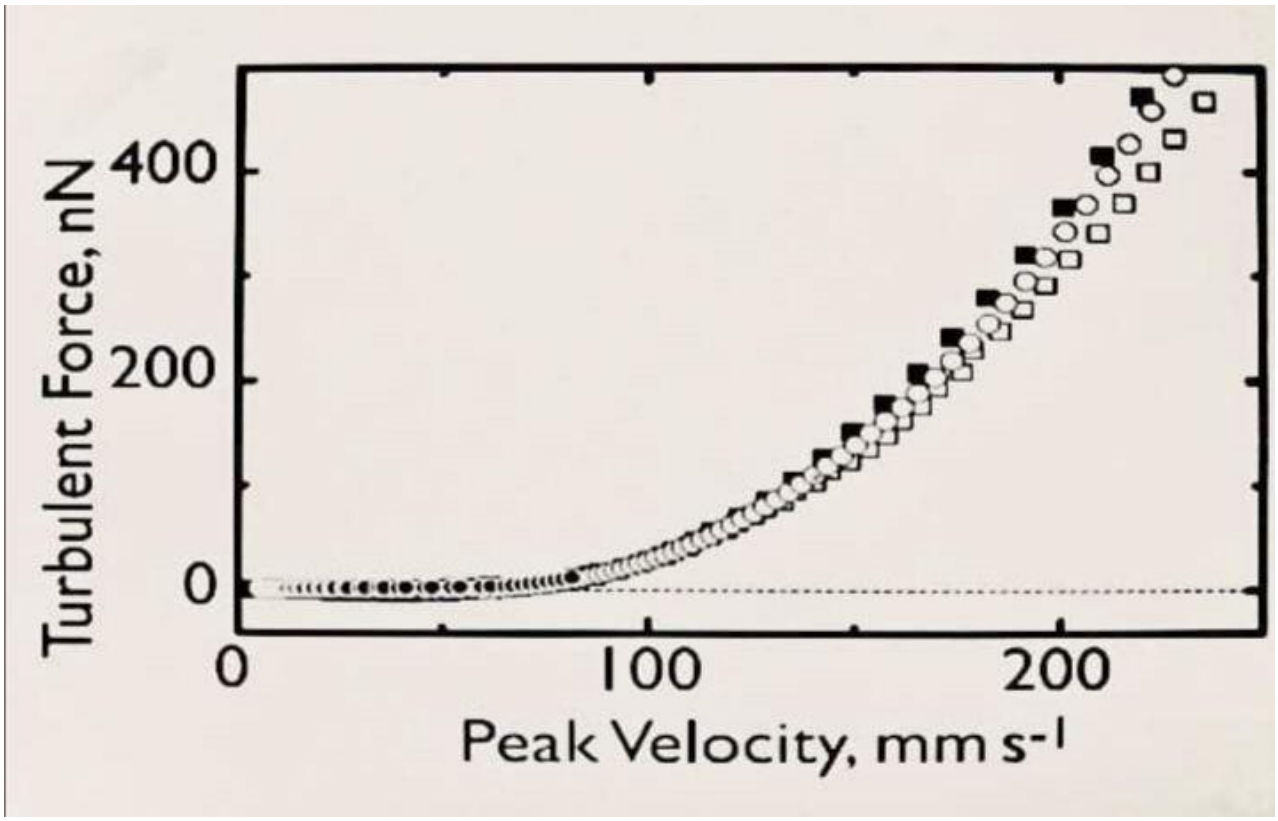


Рис. 3.3. Криві залежності сили F_{turb} від амплітуди швидкості для одного і того ж камертона при температурах від 0,05 до 1К, що показують внесок турбулентного опору в силу затухання в ^{4}He [13].

Автори роботи [13] відзначають, що сила турбулентного опору ^{4}He при низьких температурах не залежить від температури і, таким чином, вона не залежить від температури від теплової сили затухання від балістичних фононів. Це відрізняється від поведінки класичної рідини, де внески ламінарних і турбулентних потоків не адитивні.

Порівнюючи результати залежностей турбулентної сили від амплітуди швидкості для ^{4}He та концентрованих розчинів ^{3}He в ^{4}He можна відзначити, що для виникнення турбулентності в розчинах необхідні швидкості потоку приблизно в десять разів більші, ніж у чистому ^{4}He. При цьому, якщо

використовувати камертон, прикладена сила повинна відрізнятися на два порядки.

3.2. Коефіцієнт опору середовища

Коефіцієнт опору зі сторони рідини для камертона можна визначити за допомогою вираження, отриманого для опору середовища [12]:

$$F=1/2C_D\rho A v^2 \tag{3.4}$$

де C_D коефіцієнт опору, ρ – густина гелію, A - площа поперечного перерізу кожного зубця, перпендикулярна руху, LW- довжина і ширина зубця камертона, відповідно.

Зазвичай, замість сили опору F розглядають коефіцієнт опору C_D. Згідно (3.4), C_D визначається виразом:

$$C_D = 2F/(\rho A v^2) \tag{3.5}$$

На «рис. 3.4.» показаний коефіцієнт опору C_D для камертона в залежності від амплітуди швидкості вершини зубця камертона для різних температур, які відповідають даним, показаним на «рис. 3.1.».

Як видно «рис. 3.4.», при малих амплітудах швидкості сила опору пропорційна швидкості, тому коефіцієнт опору змінюється як $C_D \propto v^{-1}$.

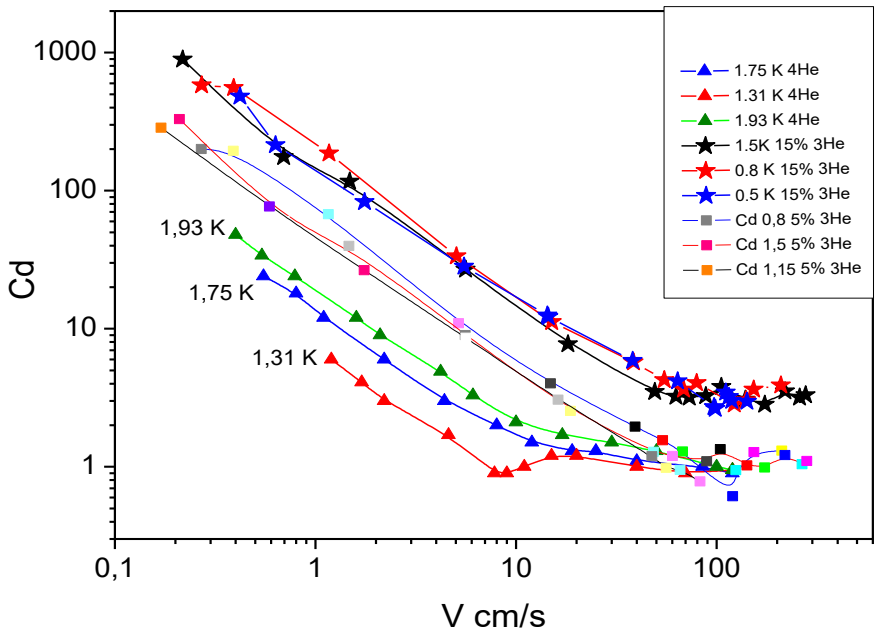


Рис. 3.4. Залежність коефіцієнта опору від амплітуди швидкості: 1 - в ^{4}He при T: 1,75 К; 1,31 К; 1,93 К; 2 - 5% розчин ^{3}He при T: 0,8 К; 1,5 К; 1,15 К; 3 - 15% розчин ^{3}He при T: 1,5 К; 0,8 К; 0,5 К.

Коефіцієнт опору розчинів при низькій амплітуді швидкості обумовлений ламінарним плином в'язкої нормальної рідини. Вид залежності коефіцієнта опору C_D чистого ^{4}He (трикутники «рис. 3.4.») обумовлений тим, що при низьких температурах довжина вільного пробігу теплових фононів, що становлять нормальну компоненту рідини, стає більше ширини зубця, і в гальмуванні переживає розсіювання балістичних фононів. При низьких температурах в опорі переважають внутрішні процеси, і вони співвідносяться з вимірюваними в вакуумі при 1,5 К. При високих температурах і більш високих швидкостях з'являється додатковий опір внаслідок виникнення вихорів і турбулентної течії. При найвищих швидкостях коефіцієнт опору наближається до значення порядку одиниці.

Коефіцієнт опору розчинів ^{3}He в ^{4}He при низьких амплітудах швидкості обумовлений ламінарним плином в'язкої нормальної компоненти рідини і також показує залежність $C_D \propto v^{-1}$. При високих амплітудах швидкості в

коефіцієнт опору вносять вклад турбулентні сили, і він наближається до постійного значення, що залежить від концентрації розчину. При цьому температурної залежності коефіцієнта опору не спостерігається, мабуть це є наслідком визначального внеску домішкових частинок ^{3}He в нормальну компоненту розчинів.

3.3. Коефіцієнт турбулентного опору середовища

Для визначення внеску турбулентності в опір середовища був обчислений коефіцієнт турбулентного опору C_DT, отриманий з турбулентної сили опору за допомогою формули:

$$C_DT = 2(F - \gamma v) / (\rho A v^2) \quad (3.6)$$

Результати розрахунків для розчину 5% ^{3}He в ^{4}He представлені на «рис. 3.5.». Відзначимо, що у наведених даних для всіх температур розчину існує явний перехід до турбулентного опору з критичною швидкістю $v_c \approx 5$см/с. Цей результат для v_c збігається з значеннями, отриманими в інших експериментах [15]:

Отримані результати можна порівняти з залежністю коефіцієнта турбулентного опору C_DT від амплітуди швидкості, отриманої в роботі [16] в чистому ^{4}He, «рис. 3.6.».

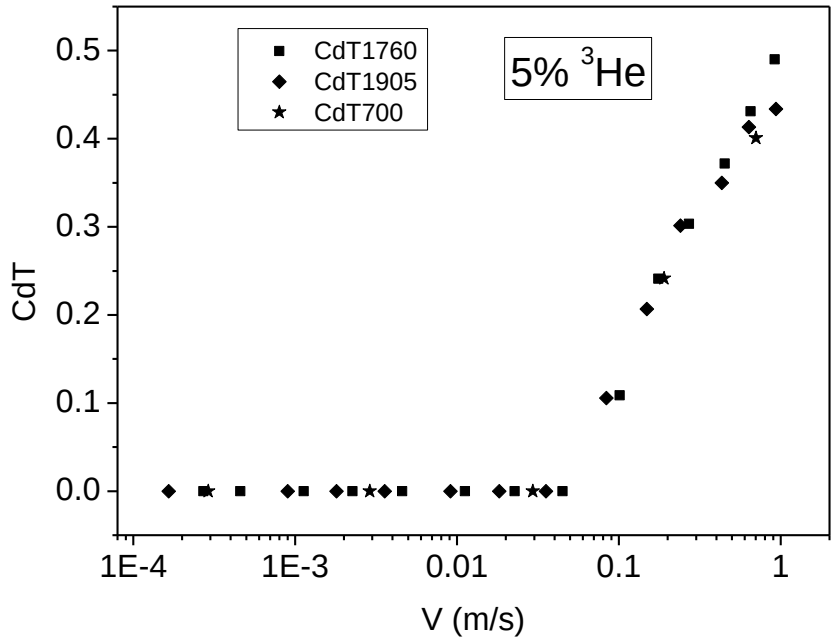


Рис. 3.5. Залежність коефіцієнта турбулентного опору від амплітуди швидкості в 5% розчині ^{3}He при Т: 1,760 К; 1,905К; 0,7 К;

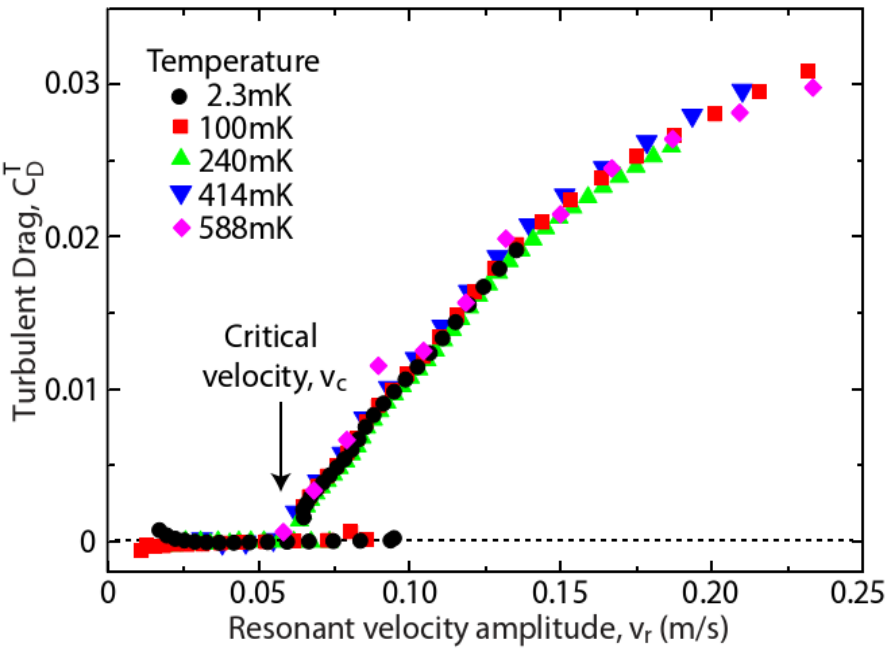


Рис. 3.6. Залежності коефіцієнта турбулентного опору від амплітуди швидкості в чистому ^{4}He, що отримані в роботі [16].

Порівняння показує, що при однакових значеннях амплітуди швидкості коливання ніжок камертона значення коефіцієнта турбулентного опору в концентрованому розчині ^{3}He в ^{4}He відрізняються приблизно в десять разів. Це ще раз показує, що додавання домішкових частинок ^{3}He збільшує стійкість надплинності до виникнення вихорів і появи турбулентної течії.

3.4. Розрахунки параметрів для коефіцієнта опору середовища

Значення виміряних та розрахованих параметрів для коефіцієнта опору в 5% розчині ^{3}He для температури T = 2,138 K наведені в таблиці 1, а для 15% розчину для температури T = 0,8 K – в таблиці 2. Аналогічні розрахунки зроблено і для інших температур.

Таблиця 1

Таблиця значень параметрів для коефіцієнта опору в 5% розчині ^{3}He для температури T = 2,138 K.

V (m/s)	F (вимір.)	F (ламін.)	LWρ	Cd
4,61436E-4	1,03E-8	1,03E-8	1,61909E-4	0
9,29E-4	2,1E-8	2,1E-8	1,61909E-4	0
0,00185	4,2E-8	4,2E-8	1,61909E-4	0
0,00464	1,05E-7	1,05E-7	1,61909E-4	0
0,00903	2,1E-7	2,1E-7	1,61909E-4	0
0,0089	4,2E-7	4,05E-7	1,61909E-4	2,33922
0,04409	1,06E-6	1,01E-6	1,61909E-4	0,31772
0,08405	2,1E-6	1,9E-6	1,61909E-4	0,34974
0,15493	4,2E-6	3,5E-6	1,61909E-4	0,36024
0,31746	1,06E-5	7,2E-6	1,61909E-4	0,41674
0,51787	2,1E-5	1,2E-5	1,61909E-4	0,41454
0,79983	4,2E-5	1,8E-5	1,61909E-4	0,46342

Таблиця 2

Таблиця значень параметрів для коефіцієнта опору в 15% розчині ^{3}He для температури T = 0,8K.

V (m/s)	F (вимір.)	F (ламін.)	LWρ	Cd
0,0027	1,113E-7	1,113E-7	1,52585E-4	0
0,0039	2,256E-7	1,613E-7	1,52585E-4	1,78148E-6
0,0116	6,933E-7	4,754E-7	1,52585E-4	2,31252E-6
0,0517	2,236E-6	2,144E-6	1,52585E-4	2,0753E-8
0,1487	6,76E-6	6,216E-6	1,52585E-4	8,77128E-8
0,3929	2,295E-5	1,641E-5	1,52585E-4	1,81584E-6
0,5378	3,435E-5	2,258E-5	1,52585E-4	3,13905E-6
0,6763	4,505E-5	2,723E-5	1,52585E-4	4,55013E-6
1,203	6,742E-5	4,82E-5	1,52585E-4	1,67287E-6
1,2464	1,118E-4	5,043E-5	1,52585E-4	1,58886E-5
1,5337	2,289E-4	6,24E-5	1,52585E-4	7,72386E-5
2,1164	4,463E-4	8,699E-5	1,52585E-4	1,88899E-4

ВИСНОВКИ

Досліджено опір надплинних рідин при коливаннях занурених в них кварцових камертонів в ламінарному і турбулентному режимах течії. Проведено розрахунки залежності сили турбулентного опору, коефіцієнта опору і вкладу турбулентності при коливаннях кварцового камертона в розчинах, що містять 5% та 15% ^{3}He в ^{4}He, як функції амплітуди швидкості коливання ніжки камертона в інтервалі температур 0,4–2,5 К.

Розрахунки показали, що кварцові камертони можуть бути використані для досліджень турбулентності не тільки в чистому ^{4}He, але і в концентрованих розчинах ^{3}He в ^{4}He. При цьому, на відміну від класичних рідин, об'єкти що коливаються в надплинних рідинах мають чітко визначену критичну швидкість переходу з ламінарного режиму до турбулентного.

В роботах [13,16], виконаних в надплинному ^{4}He, було показано, що при температурах вище 1К в опорі переважає нормальна складова. Опір виникає через в'язкий ламінарний потік при низьких амплітудах швидкості і більш складного потоку при більш високих амплітудах швидкості. При низьких температурах сила турбулентного опору в ^{4}He не залежить від температури і, таким чином, вона не залежить від теплової сили затухання від балістичних фононів. Це відрізняється від поведінки класичної рідини, де вклади ламінарних та турбулентних потоків не адитивні.

Порівняння залежностей турбулентної сили опору при коливаннях камертона від амплітуди швидкості для ^{4}He та концентрованих розчинів ^{3}He в ^{4}He показало, що для виникнення турбулентності в розчинах необхідні швидкості потоку приблизно в десять разів більші, ніж у чистому ^{4}He. При цьому прикладена сила повинна відрізнятися на два порядки.

Коефіцієнт опору розчинів ^{3}He в ^{4}He при низьких амплітудах швидкості обумовлений ламінарним плином в'язкої нормальної компоненти рідини і також як і ^{4}He показує залежність $C_D \propto v^{-1}$. При високих амплітудах швидкості

коефіцієнт опору вносять внесок турбулентні сили, і він наближається до постійного значення, що залежить від концентрації розчину. При цьому температурної залежності коефіцієнта опору не спостерігається, мабуть, це є наслідком визначального внеску домішкових частинок ^{3}He в нормальну компоненту розчинів.

Залежність коефіцієнта від амплітуди швидкості потоку при різних температурах в концентрованому розчині ^{3}He в ^{4}He також не показують помітної температурної залежності. При цьому значення турбулентного опору приблизно в десять разів більше, ніж в ^{4}He. Це переконливо показує, що додавання домішкових частинок ^{3}He збільшує стійкість надплинності до виникнення вихорів та появи турбулентної течії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1) Побелл Ф. Вещества и методы при низких температурах / Ф. Побелл, – 1992.

2) Ландау Л. Д. Статистическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва: Наука, 1962.

3) Халатников И. М. Теория сверхтекучести / И. М. Халатников. – Москва: Наука, 1971.

4) Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский . – Москва: 4 изд., 1973.

5) Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя, пер. с нем. / Г. Шлихтинг. – Москва: 1974.

6) Ландау Л. Д. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва: Наука, 1986.

7) Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 6 изд., 1987.

8) Слезкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости / Н. А. Слезкин – Москва: гл. 4 – 11., 1955.

9) Фізичні основи механіки [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://physics-lectures.ru/fizicheskie-osnovy-mexaniki/1-5-skorost/

10) Quartz tuning fork: thermometer, pressure- and viscometer for helium liquids / [R. Blaauwgeers, M. Blazkova, M. Človečko and oth.] – JLTP – 2007. – V. 146, No 5. – P. 537-562.

11) Quantum turbulence generated and detected by a vibrating quartz fork / [M. Blažková, M. Človečko, E. Gažo and oth.] – JLTP – 2007. – V. 148, No 3. – P. 305-310

12) Э. Я. Рудавский, В. К. Чаговец, Г. А. Шешин, В. А. Вракина, *ФНТ* **46**, 49 (2020).

13) D. I. Bradley, M. J. Fear, S. N. Fisher, A. M. Gu´enault, R. P. Haley, C. R. Lawson, P. V. E. McClintock, G. R. Pickett, R. Schanen, V. Tsepelin *et al.*, J. Low. Temp. Phys. **156**, 116 (2009).

14) M. Bla˘zková, D. Schmoranzer, L. Skrbek, W.F. Vinen, Phys. Rev. B **79**, 054522 (2009).

15) В. А. Вракина, Э. Я. Рудавский, С. С. Соколов, В. К. Чаговец, .Г. А. Шешин, Т. В. Чаговец, *ФНТ* **46**, 49 (2020).

16) S. L. Ahlstrom, D. I. Bradley, M. Človečko, S. N. Fisher, A. M. Guenault, E. A. Guise, R. P. Haley, O. Kolosov, P. V. E. McClintock, G. R. Pickett, M. Poole, V. Tsepelin, and A. J. Woods, *Phys. Rev. B* **89**, 014515 (2014).