

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Шешина Григорія Олександровича** “Кінетичні та динамічні ефекти у надплинному гелії та його ізотопічних розчинах в умовах неоднорідності температури та тиску” подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю

01.04.09 – фізика низьких температур

Дослідження нерівноважних і просторово-неоднорідних станів в конденсованих середовищах, а також нестационарних явищ в них, є складним завданням, як для експериментальної, так і для теоретичної фізики. Ця складність багаторазово зростає, якщо досліджуються сильно неоднорідні стани і такі стани, що далекі від термодинамічної рівноваги. Експериментальному вивченню широкого кола саме таких процесів у рідкому гелії і розчинах  $^3\text{He}$  -  $^4\text{He}$  присвячена запропонована дисертація. Додаткова складність проведених дисертантом досліджень пов'язана з тим, що поряд з характерними для нормальних систем властивостями, рідкий гелій при низьких температурах є квантовою рідиною і має властивість надплинності, тобто можливість існування в ньому при певних умовах бездисипативних потоків маси. Ця властивість, безумовно, оказує істотний вплив також на нестационарні, просторово-неоднорідні і нерівноважні процеси, як в чистому гелії, так і в розчинах  $^3\text{He}$  -  $^4\text{He}$ . Чистий надплинний  $^4\text{He}$  і розчини  $^3\text{He}$  -  $^4\text{He}$  мають багато цікавих і унікальних властивостей, і є досить зручними модельними об'єктами для вивчення кінетичних процесів і просторово-неоднорідних станів в конденсованих середовищах. Зокрема в таких системах можна контрольованим чином створювати потоки нормальної і надплинної компонент. Створюючи градієнти температур, тиску і концентрації, системи що вивчаються можна перевести в просторово-неоднорідний стан, що дозволяє аналізувати різного роду нестійкості в таких умовах.

У дисертаційній роботі Г.О. Шешина досліджено широке коло мало вивчених раніше нестационарних процесів і просторово-неоднорідних станів в He II і його ізотопічних розчинах. Серед досліджених здобувачем явищ можна відзначити такі як зародкоутворення, розшарування розчинів, дослідження рухливості міжфазної границі і її стійкості, збудження і розвиток турбулентності. Оскільки в багатьох випадках експерименти виконані в тій області низьких температур, де раніше подібні дослідження не проводилися і за допомогою своєрідних оригінальних методик, то **актуальність** теми представленої до захисту дисертації не викликає сумнівів.

У відповідності з метою в дисертації поставлені та розв'язані наступні задачі:

- визначено основні механізми дисипації енергії осцилюючого тіла, зануреного в надплинний гелій;

- досліджена конвекційна течія в розчинах  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  і її вплив на стійкість фазової границі розшарованого розчину;
- вивчена рухливість міжфазної границі розчину  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  і механізми дисипативних втрат акустичної хвилі на границі фазового розшарування;
- досліджено гетерогенне зародкоутворення в розчинах  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  в присутності конвекційної течії та проаналізовано можливі механізми зародкоутворення;
- досліджено особливості збудження турбулентної течії при наявності надплинності і проаналізовано роль нормальної компоненти в появі і розвитку турбулентності;
- вивчено вплив випромінювання джерела звуку в надплинному гелії, на критичну швидкість переходу від ламінарного до турбулентного течією;
- досліджено турбулентність в розчинах  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  і можливість конденсації  $^3\text{He}$  в області серцевин квантових вихрів;
- досліджено надплинність в двовимірних плівках  $^4\text{He}$ , адсорбованого на підкладці і з'ясовано вплив сил Ван-дер-Ваальса на температуру надплинного переходу.

**Дисертація складається** зі вступу, семи розділів з 101 рисунком і 3 таблицями, висновків та списку використаних літературних джерел з 289 найменувань (на 28 стор.). Повний обсяг дисертації становить 292 стор.

Обґрунтування актуальності теми дисертації, визначення мети та основних завдань дослідження, перелік основних нових результатів та їхнього практичного значення дано у **вступі** дисертації.

У **першому розділі** приведені дослідження кінетичних коефіцієнтів, а саме, теплопровідності, термодифузії і в'язкості. Використавши оригінальні методики, автор не тільки отримав інформацію про величини зазначених кінетичних коефіцієнтів, але і провів порівняння з теоретичними передбаченнями інших авторів. Якщо раніш були приведені експериментальні дослідження інших авторів, в роботі також наведено порівняння їх досліджень з результатами експериментів здобувача. За допомогою методики кварцового камертона досліджена дисипація енергії при коливаннях ніжок камертона за рахунок в'язкості і показано, що температурна залежність коефіцієнта опору добре пояснює всі дисипативні процеси, як в гідродинамічній, так і в балістичній області температур.

**Другий розділ** присвячено розгляду експериментальних та теоретичних методів дослідження властивостей надплинних рідин при низьких та наднизьких температурах, що їх використано в роботі. На прикладі вимірювань швидкості та поглинання першого звуку в надплинному гелії та його розчинах  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  показано, що кінетичні явища в надплинних розчинах при температурах нижчих ніж 0,2 К визначаються розсіюванням фононів та квазічастинок  $^3\text{He}$ . Отримані експериментальні результати температурної залежності

поглинання першого звуку описуються в рамках сучасної теорії розповсюдження звуку в газі фермієвських збуджень. Крім того в розділі приведені дослідження випромінювання акустичної хвилі кварцовим камертоном і її вплив на вимірювання дисипативних процесів, викликаних осцилюючим камертоном, а також запропоновані і реалізовані способи усунення акустичного випромінювання.

**Третій розділ** присвячений дослідженню сильно неоднорідних надплинних рідин, зокрема створенню неоднорідності за допомогою теплового потоку та опису нестабільності в надплинних розчинах  $^3\text{He} - ^4\text{He}$ . Показано, що при нагріванні знизу завжди спостерігається теплова нестійкість надплинного розчину  $^3\text{He} - ^4\text{He}$ , появу якої дисертант пов'язує з наявністю границі фазового розшарування. Течія надплинної компоненти уздовж міжфазної границі зі швидкостями більше критичних призводить до нестійкості границі і появи турбулентності.

У **четвертому розділі** наведено експериментальні дослідження збудження турбулентності в розчинах  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  при наднизьких температурах. Показано, що тепловий потік викликає градієнти температури і концентрації. Він також призводить до розшарування розчинів і згодом збуджує нестійкість міжфазної границі, що в свою чергу призводить до конвекційної течії у всьому об'ємі досліджуваної рідини. Автором проаналізовано початковий етап розшарування - гетерогенне зародкоутворення на квантованих вихорах і можливі причини порушення нестійкості границі.

У **п'ятому розділі** вивчається турбулентність у надплинному стані, яка збуджена коливаннями кварцового камертона. Експериментально показано, що початок і розвиток турбулентної течії при температурах нижче  $\sim 0,7$  К відрізняється від турбулентності звичайних рідин або газів. Дисертантом висунуто припущення, що при таких температурах дисипативні процеси в турбулентному стані визначаються взаємодією між квантовими вихорами і балістичним розсіюванням теплових збуджень.

**Шостий розділ** присвячено дослідженню турбулентності в надплинних розчинах  $^3\text{He} - ^4\text{He}$ . Автором показано, що в надплинних розчинах турбулентний режим розвивається ідентично звичайним рідинам або газам. Це, як припускає автор, пов'язано з великою кількістю нормальної компоненти рідини, яка визначається при цих температурах кількістю  $^3\text{He}$ . Також було виявлено, що при наднизьких температурах і швидкостях коливань ніжок камертона вище критичних для  $^4\text{He}$ , починається конденсація  $^3\text{He}$  на корі квантових вихорів, а максимальна температура початку конденсації є трохи нижче 1 К. Це узгоджується з даними експериментів інших авторів, які досліджували конденсацію  $^3\text{He}$  на вихорах порушених рухомими іонами.

Останній **сьомий розділ** дисертації присвячений вивченню двовимірної надплинності, яка обумовлена взаємодією вихор – антівихор в двовимірній плівці гелію, сконденсованого на

проміжні атомні шари дейтероводня. Кількість проміжних шарів дейтероводня змінювало сили Ван-дер-Вальса, що діють з боку підкладки на плівки гелію, а це змінювало температуру надплинного переходу. Збільшення кількості шарів дейтероводня призводило до збільшення температури надплинного переходу.

Зміст вступу до дисертації, висновків по роботі, її розділів, а також оформлення дисертації задовольняє усім вимогам що до докторських дисертацій.

**Наукова новизна отриманих результатів, положень, висновків та рекомендацій дисертації** полягає у наступному:

1. Експериментально виявлено, що при термодифузії у надплинному розчині  ${}^3\text{He}$  у  ${}^4\text{He}$  співвідношення між стаціонарними градієнтами температури та концентрації визначається парціальним тиском квазічастинок  ${}^3\text{He}$ .

2. Встановлено, що розшарування надплинного розчину  ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$  при наявності теплового потоку починається з гетерогенного зародкоутворення на квантованих вихорах.

3. Виявлено, що зі зменшенням температури коефіцієнт проходження звукової хвилі через границю розшарування розчину  ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$  суттєво зменшується, а коефіцієнт відбиття стає близьким до одиниці.

4. Встановлено, що у розчині  ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$  збільшення густини нормальної компоненти призводить до зростання критичної швидкості переходу в турбулентний режим.

5. Виявлено, що перехід від ламінарної до турбулентної течії у надплинному гелію відбувається через проміжний режим, який характеризується зростанням густини квантових вихорів та розсіянням на них теплових збуджень.

6. Визначено температурну залежність дисипації енергії коливань камертона, зануреного у надплинний гелій, та запропонована емпірична формула, яка описує температурну поведінку коефіцієнта питомого опору камертона.

7. Визначено вплив сил Ван-дер-Ваальса на температуру надплинного переходу в моноатомних плівках  ${}^4\text{He}$ .

**Наукові результати дисертації повно викладені в опублікованих працях.** Основні результати дисертації опубліковані в 25 статтях у провідних фахових українських та міжнародних журналах. Вони доповідались на багатьох міжнародних і вітчизняних наукових конференціях, опубліковані в 22 працях цих конференцій та обговорювалися з відомими фахівцями у галузі фізики низьких температур, квантових рідин та кристалів.

**Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації.**

**Наукова і практична цінність результатів, одержаних в дисертації** полягає в тому, що дисертантом були встановлені нові експериментальні данні, які суттєво розширюють і доповнюють сучасні уявлення про просторово-неоднорідні і нерівноважні стани надплинного

$^4\text{He}$  та розчинів  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ . Зокрема, отримані дані про рухливість міжфазної границі в надплинних розчинах  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  сприяють більш детальному розумінню процесу зародкоутворення нових фаз в фізичних системах різної природи. Проведені в дисертації дослідження дозволяють прогнозувати властивості конвекційних і турбулентних течій в надплинних рідинах та процесів розшарування ізотопічних розчинів гелію при низьких і наднизьких температурах. Виявлений в роботі ефект надплинного переходу в двовимірних плівках гелію має важливе значення для фізики низькорозмірних систем.

Отримані в дисертаційній роботі численні експериментальні результати повинні, безсумнівно, стимулювати теоретичні дослідження в області кінетики просторово-неоднорідних конденсованих середовищ. Результати проведених досліджень, зокрема, вказують на необхідність більш детального теоретичного дослідження рівноважних і кінетичних властивостей сумішей фермі - і бозе -частинок.

Результати роботи отримані з використанням ретельно перевірених сучасних методів експериментальної фізики низьких температур. Там де можливо, автор порівнював отримані ним дані з результатами існуючих вимірювань других авторів і сучасними теоретичними уявленнями. Все це свідчить про **достовірність** результатів роботи і **обґрунтованість** наукових положень дисертації.

**Дисертація є завершеним науковим дослідженням в галузі фізики конденсованих квантових систем при низьких температурах** яке вирішує складну наукову проблему вивчення кінетичних і просторово-неоднорідних процесів, що відбуваються в рідкому  $^4\text{He}$  та розчинах  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ . Оригінальні результати що містяться в дисертації отримані вперше, або за допомогою нових методів.

Разом із тим є такі **зауваження стосовно змісту дисертації**.

1. В роботі, при аналізі процесів або формул, неодноразово зустрічаються твердження, що внеском квазічастинок певного виду або деякими складовими у формулах в даній області температур можна знехтувати. При цьому не наводиться жодних оцінок і не вказується точність, з якою таке наближення було зроблено. Варто було б, хоча б грубо, привести такі оцінки.

2. На початку розділу 5 на сторінці 178 є твердження, що в He II існує надплинна рідина з нульовою в'язкістю і нормальна рідина, що має в'язкість. Це твердження є неточним. Існує єдина рідина, надплинний гелій і процеси дисипації відносяться до всієї рідини в цілому. Особливістю надплинного поля швидкості є те, що в стаціонарних квазірівноважних умовах можливе перенесення маси з цією швидкістю, яке не супроводжується тертям. У нерівноважних, нестаціонарних умовах загасає як нормальна, так і надплинна компоненти.

3. Автор спостерігав скачки на амплітудно-частотній характеристиці камертона, зануреного в п'ятивідсотковий розчин  $^3\text{He}$  в He II. Ці скачки дисертант пов'язує зі зміною

структури квантованого вихору в розчині  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  II і вважає, що їм вперше спостерігалася залежність температури початку конденсації домішок  $^3\text{He}$  на серцевині вихору від швидкості коливань камертона. Хоча таке трактування можливе, проте слід зазначити, що, згідно з наведених в дисертації посиланнях, є тільки дві теоретичні роботи, де досліджується поведінка домішок  $^3\text{He}$  поблизу серцевини вихору і одна експериментальна робота, в якій автори вважають, що ними спостерігалася адсорбція  $^3\text{He}$  на осі вихору. Тому, на думку опонента, питання про поведінку домішок поблизу квантового вихору потребує подальших досліджень, як і ті явища, що спостерігалися здобувачем при дослідженні амплітудно-частотної характеристики камертона.

4. Дисертація добре оформлена, але в тексті зустрічаються описки і невдалі стилістичні обороти, наприклад на сторінках 15, 17, 22, 24, 53, 77.

**Наведені зауваження не змінюють загальну високу оцінку дисертації і не впливають на результати проведених досліджень.**

За актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, рівнем наукових публікацій, новизною та практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота Г.О. Шешина відповідає спеціальності 01.04.09 – фізика низьких температур.

На підставі викладеного вище вважаю, що дисертаційна робота “Кінетичні та динамічні ефекти у надплинному гелії та його ізотопічних розчинах в умовах неоднорідності температури та тиску” відповідає усім вимогам МОН України щодо докторської дисертацій, зокрема пунктам 9, 10, 12 “Порядку присудження наукових ступенів”, а автор роботи Шешин Григорій Олександрович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.09 – фізика низьких температур.

Офіційний опонент, доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
ННЦ “Харківський фізико-технічний інститут”  
НАН України, начальник лабораторії дифузійних  
та електронних явищ у твердих тілах

Ю. М. Полуктов



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Голова сектору  
05 2017 р.