

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Геращенко Надії Олексіївни

«Вплив гідродинамічних мод на коливання тіл

у надплинних розчинах $^3\text{He} - ^4\text{He}$ »

яка подається на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 Природничі науки

за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали

1. Оцінка роботи здобувача у процесі підготовки дисертації і виконання індивідуального плану навчальної та наукової роботи

Аспірантка Геращенко Надія Олексіївна повністю виконала індивідуальний план освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. **Освітня складова** програми у обсязі 40 кредитів ECTS опанована в повному обсязі. Аспірантка успішно склала шість заліків та три екзамени з наступних навчальних дисциплін:

- складено залік з навчальної дисципліни «Філософські засади та методологія наукових досліджень»;
- складено залік з навчальної дисципліни «Іноземна мова для аспірантів»;
- складено залік з навчальної дисципліни «Підготовка наукових досліджень та презентація результатів досліджень»;
- складено залік з навчальної дисципліни «Інформаційні технології у прикладній фізиці» (96 балів);
- складено залік з навчальної дисципліни «Актуальні проблеми сучасної прикладної фізики та наноматеріалів»;
- складено залік з навчальної дисципліни «Новітні технології обробки даних у фізиці»;
- складено іспит з навчальної дисципліни «Іноземна мова для аспірантів» (99 балів);
- складено іспит з навчальної дисципліни «Актуальні проблеми сучасної прикладної фізики та наноматеріалів» (90 балів);
- складено іспит з навчальної дисципліни «Новітні технології обробки даних у фізиці» (99 балів).

Під час виконання **наукової складової** усі заплановані види робіт було виконано своєчасно. Здобувачка демонструвала високу відповідальність та

системність у роботі, а також плідно співпрацювала із науковим керівником протягом усього періоду навчання в аспірантурі.

Індивідуальний план виконання освітньо – наукової програми підготовки доктора філософії виконано в повному обсязі та в установлені строки.

2. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Одним із найінформативніших підходів до дослідження квантових рідин, зокрема рідкого гелію, є аналіз поведінки механічних об'єктів, що коливаються у цих середовищах. У цьому контексті кварцові камертони зарекомендували себе як чутливі інструменти для зондування фізичних властивостей рідкого гелію при наднизьких температурах. Їхнє широке впровадження у кріогенних експериментах пов'язане з поєднанням низки переваг — від стабільності та простоти використання до високої резонансної якості та інженерної доступності. Серед таких переваг також необхідно зазначити доступність, невисоку вартість, довготривалу надійність, нечутливість до магнітного поля та низьким внутрішнім демпфуванням. Усе це робить кварцові камертони привабливими для застосування у фізичних експериментах.

Завдяки цим характеристикам, камертони стали серйозною альтернативою традиційним вібруючим дротам, які раніше вважалися стандартними резонаторами для дослідження рідкого гелію. Вони дають змогу суттєво зменшити складність експериментальної апаратури й підвищити стабільність вимірювального процесу. Водночас, через специфіку фізичних властивостей і геометричну складність самих камертонів, виникає низка викликів. Зокрема, акустичні ефекти, дисипативні явища та можливість виникнення непередбачуваних резонансів ускладнюють аналіз результатів і можуть знижувати точність вимірювань.

Для повноцінного використання потенціалу кварцових камертонів у дослідженнях надплинних систем, зокрема ізотопних розчинів гелію, необхідно глибоко проаналізувати їхню резонансну поведінку в рідкому гелії. Це передбачає як експериментальні дослідження, так і побудову відповідних теоретичних моделей, що враховують акустичні, гідродинамічні й дисипативні ефекти.

Актуальність таких досліджень зумовлена як зростаючою потребою в компактних, високоточних та стабільних методах зондування квантових середовищ, так і наявністю значної кількості експериментальних результатів, отриманих у дослідженнях надплинних рідин, які досі не мають повного теоретичного обґрунтування

Мета і задачі дослідження. Основна мета цієї роботи – дослідити фізичні механізми, що визначають взаємодію гідродинамічних мод (першого та другого звуків, в'язкої, дифузійної та теплової хвиль) із тілами, що коливаються в рідкому гелії. Для досягнення цієї мети були поставлені та виконані наступні задачі дослідження:

- розглянути процеси випромінювання й поглинання енергії в надплинних розчинах,
- вивчити звукові резонанси в критичному гелії, а також проаналізувати резонансні особливості першого і другого звуків у надплинному гелії та розчинах його ізотопів
- розробити теорію повної системи гідродинамічних мод цих розчинів;
- розв'язати задачу про одночасне збудження першого та другого звуків у надплинному гелії внаслідок збудження камертоном хвиль тиску й ентропії;
- отримати явні вирази для коефіцієнтів дифузії, теплопровідності та термодифузії для рідких і твердих розчинів ізотопів гелію у моделі суміші газів квазічастинок;
- знайти дисперсійні співвідношення для першого, другого звуків, та дисипативних теплових хвиль для надплинних розчинів ^3He – ^4He , та визначити співвідношення між амплітудами всіх гідродинамічних параметрів у цих модах;
- врахувати внесок дисипативної дифузійної теплової хвилі у зникнення резонансів другого звуку, які спостерігалися в експерименті;
- отримати явні вирази для амплітуд концентраційних та температурних збурень, викликаних коливаннями твердої стінки в гелії.

Об'єктом є дослідження дисертаційної роботи є релаксаційні процеси в надплинних розчинах квантових рідин.

Предметом дослідження є повна система гідродинамічних мод надплинних розчинів ^3He – ^4He і їх взаємодія з тілами, що коливаються в рідкому гелії.

Методи дослідження. Для визначення повного набору нормальних розв'язків системи гідродинамічних рівнянь надплинних розчинів ізотопів гелію ^3He – ^4He були використані методи перетворення Фур'є. Зокрема, знаходження власних чисел матриці системи цих рівнянь дозволило встановити дисперсійні співвідношення для кожної з мод, а обчислення власних векторів цієї матриці — визначити співвідношення між амплітудами гідродинамічних величин у складі кожної з них. Такий підхід дав змогу також побудувати функції Гріна задачі, що описують часову релаксацію

початкових збурень параметрів розчину. Для дослідження резонансних властивостей системи "кварцовий камертон — рідкий гелій" було проведено моделювання диференціальних рівнянь, що описують коливальний процес з урахуванням реальних геометричних і фізичних характеристик камертона та середовища. Для знаходження явних виразів для кінетичних коефіцієнтів було застосована методика використання кінетичних рівнянь для функцій розподілу системи квазічастинок та їх розв'язання в випадку слабого відхилення від стану рівноваги.

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

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна та була складовою частиною держбюджетного наукового проекту Міністерства освіти і науки України № державної реєстрації роботи: 0122U001482 — «Взаємодія квазічастинок з поверхнями наноструктур довільної ступені шорсткості». Також робота була частково підтримана за рахунок програми «Гранти на дистанційні дослідження для українських дослідників», проекту EURIZON, за грантовою угодою ЄС № 871072.

4. Особистий внесок дисертанта в отримання наукових результатів та їх новизна полягає в наступному:

Особистий внесок здобувачки полягає в участі у постановці, обговоренні та розв'язання поставленої задачі та визначенні мети дослідження, теоретичному обґрунтуванні підходів до розв'язання задачі, аналітичному опрацювання задачі та розрахункової частини, проведенні розрахунків, а також в участі у розробці концепції статей, оформленні тексту робіт, та аналізі літературних джерел.

У дисертаційній роботі здобувачкою **вперше:**

1. Пояснено експериментально спостережуване збудження стоячих хвиль коливальних тиску камертоном, а також детально розглянуто появу та властивості резонансів залежно від температури й тиску гелію. Побудовано теоретичну модель, яка описує фізичні механізми резонансних явищ, що спостерігалися експериментально.
2. Розв'язано задачу про одночасне збудження першого та другого звуків у надплинному гелії внаслідок збудження камертоном хвиль тиску й ентропії, а також пояснено експериментально спостережувані залежності властивостей резонансів від температури та тиску гелію.

3. Отримано явні вирази для коефіцієнтів дифузії, теплопровідності та термодифузії для рідких і твердих розчинів ізотопів гелію, та визначено явний вираз коефіцієнта самодифузії домішок у твердих розчинах ^3He – ^4He .
4. Шляхом розв'язання повної системи гідродинамічних рівнянь для надплинних розчинів ^3He – ^4He , знайдено дисперсійні співвідношення для першого та другого звуків, а також дисипативних теплових хвиль. Визначено взаємозв'язки між амплітудами всіх гідродинамічних параметрів у цих модах.
5. Доведено, що врахування дисипативної дифузійної теплової хвилі дозволяє пояснити зникнення резонансів другого звуку, які спостерігалися в експерименті.
6. Отримано явні вирази для амплітуд концентраційних та температурних збурень, викликаних коливаннями твердої стінки в гелії. Проведені розрахунки показали, що спостережувана в експерименті різниця в ослабленні відкритого та закритого камертонів може бути зумовлена конкуренцією між механізмами другого звуку та дифузійної хвилі.
7. Продемонстровано, що знайдений у дисертації механізм одночасного поширення енергії в дисипативній хвилі та у звуковій хвилі другого звуку може бути використаний для створення нових ефективних методів тепловідведення в наноструктурах.

5. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, результатів і висновків дисертації.

Наукові положення, результати та висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими та достовірними. Вони базуються на чітко сформульованих фізичних моделях, строгому математичному аналізі рівнянь гідродинаміки надплинних систем, а також на розв'язанні відповідних крайових задач.

Об'єктивність і достовірність результатів підтверджуються також коректним використанням апробованих фізичних підходів, системним урахуванням температурних, концентраційних та геометричних факторів у досліджуваних системах. Основні теоретичні висновки дисертації узгоджуються з наявними експериментальними даними, зокрема щодо резонансних явищ і затухання коливань у надплинному гелії. Всі результати була представлені на наукових конференціях і опубліковані у фахових виданнях, індексованих наукометричною базою Scopus, що також засвідчує їхню достовірність. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

6. Наукове, теоретичне та практичне значення отриманих результатів.

Дослідження коливальних режимів тіл у надплинних розчинах гелію мають як фундаментальне, так і прикладне значення. Зокрема, кварцові камертони зарекомендували себе як надзвичайно чутливі зонди для точного вимірювання в'язкості, густини та інших характеристик квантових рідин у кріогенних умовах, аж до мілікельвінових температур. Це відкриває широкі можливості для використання таких структур у сенсорних системах квантових комп'ютерів, у фізиці низьких температур, при охолодженні надпровідників, а також у техніці створення детекторів для фізики частинок.

Розробка математичних моделей взаємодії тіл із надплинним середовищем дозволяє не лише пояснювати експериментальні результати, а й прогнозувати поведінку таких систем за складних умов — при наявності неоднорідностей, зовнішніх збурень або багатокomпонентності середовища.

Отже, результати роботи можуть бути використані як для поглиблення теоретичних знань про квантові рідини, так і для створення нових високоточних технологій у галузі квантової метрології, кріоінженерії та надпровідникової електроніки.

Результати дисертаційного дослідження, а саме теоретичний матеріал та методики були впроваджені у навчальний процес в дисциплінах пов'язаних з вивчення як математичних дисциплін, пов'язаних з розв'язанням рівнянь математичної фізики, так й фізичних дисциплін, таких як гідродинаміка, фізика конденсованих середовищ та фізична кінетика, зокрема на кафедрі комп'ютерної фізики навчально-наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики Харківського національного університету імені В.Н.Каразін. Також, результати досліджень можуть бути використані в наукових дослідженнях Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України пов'язаних з коливанням складних систем, що містять рідини та тверди тіла, та в експериментальних та теоретичних дослідженнях Фізико-технічного інституту низьких температур ім. І.Є.Веркіна, пов'язаних з майбутніми дослідженнями релаксаційних процесів у квантових рідинах та їх розчинах при низьких та наднизьких температурах.

7. Повнота викладення матеріалів дисертації в роботах, опублікованих автором.

Результати дисертаційної роботи повністю опубліковані у 5 наукових працях, серед яких 4 наукові статті опубліковано у наукових періодичних виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus, 1 наукова стаття

опублікована у наукових фахових виданнях України, та 8 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації
Публікації у закордонному періодичному науковому виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus

1. Vikhtinskaya T. G., **Herashchenko N. O.**, Nemchenko K. E.. Second sound resonances in superfluid ^3He – ^4He mixtures. *Low Temp. Phys.*, 2022; Vol. 48. Iss. 2. P 117. (Scopus, Q3).

Key words: tuning fork, first sound, second sound, resonances, superfluid ^3He – ^4He mixtures

DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0009290>

URL: <https://pubs.aip.org/aip/ltp/article-abstract/48/2/117/252973/Second-sound-resonances-in-superfluid-3He-4He?redirectedFrom=fulltext>

ISSN: 1063777X

2. **Herashchenko N. O.**, Nemchenko E. K., Nemchenko K. E., Vikhtinskaya T. G. Kinetic properties of solid ^3He – ^4He mixtures in the model of freely moving impuritons. *Low Temp. Phys.* 2022; Vol. 48. Iss. 8. P. 583. (Scopus, Q3).

Key words: quantum diffusion, quantum crystals, solid solutions ^3He – ^4He , impurities, phonons, diffusion, self-diffusion, thermal conductivity

DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0012645>

URL: <https://pubs.aip.org/aip/ltp/article-abstract/48/8/583/2846277/Kinetic-properties-of-solid-3He-4He-mixtures-in?redirectedFrom=fulltext>

ISSN: 1063777X

3. **Herashchenko N.**, Nemchenko K., Rogova S., Vikhtinskaya T. Collective mode resonances in superfluid ^3He – ^4He mixtures. *Low Temp. Phys.* 2023; Vol. 49. Iss. 2. P. 171. (Scopus, Q3).

Key words: superfluid helium mixtures, resonances, quartz tuning fork, dissipative and acoustic modes

DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0016841>

URL: <https://pubs.aip.org/aip/ltp/article-abstract/49/2/171/2871370/Collective-mode-resonances-in-superfluid-3He-4He?redirectedFrom=fulltext>

ISSN: 1063777X

4. Amrit J., **Herashchenko N.**, Nemchenko K., Rogova S., Vikhtinskaya T. Two-mode dissipation of oscillating tuning fork in ^3He – ^4He superfluid mixtures. *Low Temp. Phys.* 2025. Vol. 51. Iss. 1. P. 5. (Scopus, Q3).

Key words: energy dissipation, helium solution, temperature and concentration oscillations, second sound wave, diffusion dissipative wave

DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0034553>

URL: <https://pubs.aip.org/aip/lt/article-abstract/51/1/5/3329441/Two-mode-dissipation-of-oscillating-tuning-fork-in?redirectedFrom=fulltext>

ISSN: 1063777X

Публікації у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

5. **Herashchenko N.O.**, Nemchenko K.E., Vikhtinskaya T.G., Rogova S.Yu. Sound resonances in supercritical and superfluid helium. Вісник ХНУ імені В.Н. Каразіна, серія «Фізика», вип. 34, 2021. с. 33-35

Key words: acoustic resonance, superfluid helium, supercritical helium, standing wave, density fluctuations

DOI: <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2021-34-05>

URL: <https://periodicals.karazin.ua/physics/article/view/17515/20681>

ISSN: 2222-5617

8. Апробації матеріалів дисертації

Результати дисертаційної роботи були представлені у доповідях на таких вітчизняних та міжнародних наукових конференціях:

6. **Herashchenko N. O.**, Nemchenko K.E., Vikhtinskaya T.G. Mutual transformation of acoustic and thermal waves in superfluid liquids. *International Advanced Study Conference Condensed Matter and Low Temperature Physics 2020*. Book of Abstracts. 8 – 14 June 2020, Kharkiv, Ukraine, p. 86.
7. **Herashchenko N. O.**, Nemchenko K.E., Vikhtinskaya T.G. Sound resonances in critical and superfluid helium. *International Conference for Young Professionals in Physics and Technology 2021*. Book of Abstracts. 26 – 30 April 2021, Kharkiv, Ukraine, p. 38.
8. **Herashchenko N. O.**, Nemchenko K.E., Vikhtinskaya T.G. Second sound resonances in superfluid ^3He – ^4He mixtures. *II International Advanced Study Conference Condensed Matter and Low Temperature Physics 2021*. Book of Abstracts. 6 – 12 June 2021, Kharkiv, Ukraine, p. 103.
9. **Herashchenko N. O.**, Vikhtinskaya T.G., Rogova S.Yu., Nemchenko K.E. Influence of dissipative diffusion mode to the resonances of second sound generated by oscillating quartz tuning forks in superfluid helium. *Quantum Fluids and Solids – QFS 2021 International Online Conference*. Participation certificate. 10–19 August 2021, Bangalore, India.

10. **Herashchenko N. O.**, Vikhtinskaya T.G., Rogova S.Yu., Nemchenko K.E. Collective mode resonances in superfluid ^3He – ^4He mixtures. *LT29 – 29th International Conference on Low Temperature Physics*. Poster. 18–24 August 2022, Sapporo, Japan.
11. **Herashchenko N. O.**, Vikhtinskaya T.G., Nemchenko Ye.K., Nemchenko K.E., Rogova S.Yu. Resonances of Closed Vibrating Fork in Superfluid ^3He – ^4He Mixtures. *III International Conference Condensed Matter and Low Temperature Physics 2023*. Book of Abstracts. 5–11 June 2023, Kharkiv, Ukraine, p. 103.
12. **Herashchenko N.**, Amrit J., Nemchenko K., Rogova S. Effectiveness of heat transfer by sound and thermal conductivity in superfluid. *20th International Conference of Young Scientists on Energy and Natural Sciences Issues*. Book of Abstracts. 21–23 May 2024, Kaunas, Lithuania, p. 63.
13. **Herashchenko N.**, Amrit J., Nemchenko K., Rogova S., Vikhtinskaya T. Two-step energy dissipation of oscillating tuning fork in ^3He – ^4He superfluid mixtures. *VI International Conference Condensed Matter and Low Temperature Physics 2024*. Book of Abstracts. 3–7 June 2024, Kharkiv, Ukraine, p. 124

9. Дотримання академічної доброчесності.

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що дисертація виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

10. Оцінка мови та стилю дисертації

Матеріал дисертації викладено у логічній послідовності, доступній для сприйняття, із дотриманням норм наукового стилю викладу. Структура дисертації відповідає логіці проведеного дослідження, відображаючи послідовність вирішення поставлених наукових завдань. Зміст, оформлення та обсяг дисертаційної роботи, а також кількість і рівень публікацій повністю відповідають вимогам, визначеним постановою Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова

КМУ від 12 січня 2022 року № 44, зі змінами), а також постанові КМУ від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (із відповідними змінами, внесеними згідно з наказом МОН України від 31.05.2019 р. № 759).

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.

За своїм професійним спрямуванням, науковою новизною та практичною значущістю дисертаційна робота Геращенко Надії Олексіївни на тему «Вплив гідродинамічних мод на коливання тіл у надплинних розчинах $^3\text{He} - ^4\text{He}$ » відповідає спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали. Здобувачка повністю виконав як освітню, так і наукову складові освітньо – наукової програми підготовки доктора філософії.

12. Результати обговорення та проведення презентації. Рекомендація дисертації до захисту.

Здобувачка представила основні результати своєї дисертаційної роботи під час розширеного засідання кафедри комп'ютерної фізики навчально–наукового інституту комп'ютерної фізики та енергетики Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна (протокол №6-1/25 від 9 червня 2025 року) у формі наукової презентації з подальшим обговоренням. За результатами фахової дискусії, з урахуванням високої якості проведених досліджень, актуальності теми, наукової новизни отриманих результатів, а також їхньої наукової та прикладної значущості, члени кафедри одностайно підтримали рішення рекомендувати дисертаційну роботу Геращенко Надії Олексіївни «Вплив гідродинамічних мод на коливання тіл у надплинних розчинах $^3\text{He} - ^4\text{He}$ » до захисту у спеціалізованій вченій раді для здобуття наукового ступеня доктора філософії за галуззю знань 10 «Природничі науки», спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Завідувач кафедри комп'ютерної фізики
навчально–наукового інституту
комп'ютерної фізики та енергетики
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна
доктор фіз.–мат. наук, професор



Костянтин НЕМЧЕНКО