

АНОТАЦІЯ

Геращенко Н.О. Вплив гідродинамічних мод на коливання тіл у надплинних розчинах ^3He – ^4He – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали (галузь знань 10 Природничі науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2025.

Дисертацію присвячено дослідженню повного набору гідродинамічних мод у чистому гелії та у надплинних розчинах ^3He – ^4He та їх впливу на розповсюдження тепла та коливання тіл, що занурені в гелій.

Дослідження квантових середовищ через спостереження за коливаннями тіл, занурених у гелій, завжди було потужним інструментом для виявлення унікальних властивостей цих речовин. За останні роки особливо великої популярності набули кварцові камертони як універсальні зонди для дослідження рідкого гелію при низьких температурах. Це стало можливим завдяки кільком важливим властивостям камертонів, які роблять їх надзвичайно зручними та ефективними інструментами для фізичних вимірювань. Зокрема, вони є легко доступними та мають низьку вартість, що робить їх доступними для широкого використання в наукових дослідженнях. Крім того, кварцові камертони мають високу надійність, що дозволяє проводити довготривалі експерименти без ризику поломки або потреби в частих калібруваннях. Простота схем вимірювань, низька внутрішня характеристика демпфування та нечутливість до магнітного поля також є важливими перевагами, що дозволяють здійснювати точні вимірювання в складних умовах.

Завдяки своїм унікальним властивостям кварцові камертони стали альтернативою вібруючим дротам, які традиційно використовуються як стандартні резонатори для дослідження рідкого гелію. Вони суттєво

спрощують експериментальну апаратуру, зменшуючи технічну складність вимірювань. Проте їх застосування пов'язане з певними проблемами, зумовленими як фізичними особливостями, так і складнішою геометрією самих камертонів. Це створює труднощі при їх використанні як вимірювальних приладів для вивчення параметрів рідкого гелію. Зокрема, акустичні ефекти та дисипативні процеси суттєво впливають на результати вимірювань. Крім того, високочастотні коливання камертонів можуть викликати непередбачувані явища, що ускладнює забезпечення високої точності вимірювань у таких системах.

Щоб максимально використати переваги кварцових камертонів у вивченні фундаментальних властивостей надплинних розчинів ізотопів гелію, необхідно детально дослідити їх резонансні характеристики в рідкому гелії як теоретично, так і експериментально. Такі дослідження дадуть змогу глибше зрозуміти механізми формування різних резонансів, а також визначити вплив акустичних і гідродинамічних ефектів на точність вимірювань у подібних системах.

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. Зокрема, розглядаються процеси випромінювання й поглинання енергії в надплинних розчинах, вивчаються звукові резонанси в критичному гелії, а також аналізуються резонансні особливості першого і другого звуків у надплинному гелії та розчинах його ізотопів. Дослідження цих явищ спрямоване не лише на вдосконалення методів вимірювання властивостей рідкого гелію, а й на глибше розуміння фізичних процесів, що відбуваються в цих унікальних матеріалах за низьких температур.

Особлива увага в дисертації приділяється дослідженню надплинних розчинів ізотопів гелію та розробці теорії повної системи гідродинамічних мод цих розчинів.

Актуальність цих завдань зумовлена значною кількістю нових експериментальних результатів, отриманих при зануренні осцилюючого кварцового камертона в надплинні розчини ^3He – ^4He з різними концентраціями ^3He — від малих до 15%. Ці експерименти дозволили виявити важливі властивості, які відрізняються від характеристик чистого гелію, що має ключове значення для розуміння фізичних процесів у таких системах.

Однією з основних відмінностей розчинів ^3He – ^4He є наявність квазічастинок ^3He , що існують у них за будь-яких температур, включаючи області, близькі до абсолютного нуля. Дослідження цих квазічастинок є важливим для вивчення фізичних властивостей розчинів.

Ще однією особливістю таких систем при не дуже малих концентраціях є надзвичайно короткий час взаємодії між квазічастинками ^3He , що дозволяє розглядати їх у гідродинамічному наближенні. Це припущення особливо важливе для розчинів з відносно високими концентраціями ^3He (10 – 15%), у яких проводилися експерименти, що виявили цілу низку незвичайних явищ.

У цих концентраційних межах осциляції твердої стінки, наприклад, кварцових камертонів, можуть збуджувати не лише перший звук, а й другий звук, а також генерувати теплову хвилю. Це пояснюється особливостями перенесення тепла та маси в надплинних розчинах ^3He – ^4He . Зокрема, концентраційні та температурні збудження в таких сумішах можуть релаксувати як у вигляді хвилі другого звуку, так і у формі дисипативної дифузійної хвилі — окремого фізичного процесу, що виникає при зміні температури або концентрації в подібних системах. Ці явища були детально вивчені в дисертаційній роботі, де розглянуто їхній вплив на динаміку розчинів та можливість використання отриманих результатів для глибшого розуміння теплопереносу й інших фізичних процесів.

До таких унікальних явищ належить так званий другий звук — незвичайна форма поширення теплових хвиль у надплинних рідинах за низьких температур. Це явище має ключове значення для вивчення квантових рідин та макроскопічних квантових ефектів.

На відміну від звичайного (першого) звуку, який є акустичною хвилею, що поширюється завдяки коливанням атомів і молекул, другий звук пов'язаний із термодинамічними процесами та колективним рухом фаз рідини. У цій хвилі основну роль відіграють зміни температури та концентрації компонентів рідини. Таким чином, другий звук являє собою теплові хвилі, що виникають через фазове розділення та особливий механізм теплопереносу, характерний для надплинного гелію.

У сумішах ^3He – ^4He другий звук проявляється найсильніше при високих концентраціях ^3He (10 – 15%). У таких умовах його вплив на процеси теплопереносу, дифузії та інших фізичних явищ стає особливо помітним. Дослідження цього ефекту дозволяють глибше зрозуміти поведінку квантових рідин за наднизьких температур, а також сприяють розвитку нових методів вимірювання термодинамічних властивостей рідких сумішей.

Останнім часом інтерес до другого звуку значно зріс через його виявлення в наносередовищах. Новітні дослідження теплопередачі у графені, графіті та інших двовимірних і шаруватих матеріалах показали, що фононна гідродинаміка, включно з другим звуком, має важливі практичні наслідки. Це відкриває перспективи для використання фононних гідродинамічних ефектів у керуванні тепловим балансом у сучасних мікро– та наноелектронних пристроях.

Результати експериментальних досліджень показали, що другий звук в твердих тілах і рідинах більше не можна вважати рідкісним або суто академічним явищем. Зокрема, фононна гідродинаміка може вплинути на продуктивність графену та графіту як теплопровідних матеріалів у мікроелектроніці, що відкриває нові можливості для ефективного управління тепловими потоками в нанорозмірних системах.

У дисертації аналізується принципова можливість використання другого звуку для ефективного тепловідведення, а також перспективи його застосування в охолодженні обчислювальних пристроїв.

Другим важливим механізмом є дифузійна дисипативна хвиля, яка є унікальною для розчинів. У надплинних розчинах ^3He – ^4He , на відміну від чистого ^4He , поряд із другою звуковою хвилею виникає ще одна, суто дисипативна мода, яка також визначає релаксацію температури та концентрації. У цій моді еволюція збурень температури та концентрації відбувається під впливом теплопровідності, термодифузії та масової дифузії розчину.

Існування двох незалежних мод, що відповідають за встановлення рівноваги температури та концентрації, вимагає їх одночасного врахування при описі різних процесів релаксації в надплинних розчинах ^3He – ^4He . Водночас задача про просторово–часову еволюцію температури та концентрації залишається нерозв’язаною, попри значну кількість проведених експериментів у цій галузі. Більше того, деякі експериментальні результати досі не мають задовільного теоретичного пояснення, що підкреслює актуальність подальших досліджень у цій сфері.

Для теоретичного опису спостережуваних явищ у чистому гелії та надплинних розчинах у широкому діапазоні температур і концентрацій було вирішено задачу релаксації на основі повної системи гідродинамічних рівнянь для розчинів ^3He – ^4He . За допомогою перетворення Фур’є, формалізму неермітових матриць та функцій Гріна було отримано розв’язок цієї системи для миттєвого точкового джерела тепла або початкового збурення концентрації. Розв’язок виражено через функції Гріна, які описують два основних механізми релаксації: дисипативний (за рахунок теплопровідності, дифузії та термодифузії) та хвильовий (зумовлений поширенням другого звуку). У результаті знайдено загальне рішення задачі про релаксацію довільного початкового збурення на нескінченній прямій.

На наступному етапі роботи, виходячи з повної системи гідродинамічних рівнянь, було проведено дослідження коливань густини, температури, концентрації та тиску з метою визначення умов, за яких коливання твердої стінки збуджують перший і другий звук, а також дисипативну дифузійну

хвилю в надплинному гелії та акустичні хвилі в надкритичному гелії. Було виконано обчислення внесків цих процесів у формування резонансів під час коливань закритих камертонів.

Зокрема, розглянуто експериментально спостережуване збудження стоячих хвиль тиску камертоном, що коливається, а також особливості появи й поведінки резонансів залежно від температури та тиску гелію.

У результаті цих досліджень було створено модель, яка описує фізичні властивості резонансних явищ, що спостерігалися експериментально. Зокрема, детально досліджено резонанси, що виникають під час коливань кварцових камертонів у надплинному гелії та його розчинах.

Для проведення порівняння з експериментальними даними необхідно було отримати явні вирази для дисипативних коефіцієнтів розчинів ізотопів гелію. З цією метою, в рамках газокінетичної моделі, яка описує суміш слабковзаємодіючого газу квазічастинок — фононів та домішок, й виходить з системи кінетичних рівнянь для цих частинок, було досліджено дисипативні властивості як рідких, так і твердих розчинів ^3He – ^4He .

Розглядалися такі явища, як масова та спінова дифузія, самодифузія і теплопровідність, у широкому діапазоні температур та концентрацій. Особливу увагу приділено області, де домішки ^3He можна розглядати як квазічастинки, що вільно рухаються крізь рідину або кристал, що дозволило суттєво спростити розрахунки та отримати аналітичні вирази для відповідних коефіцієнтів переносу. У результаті розрахунків було отримано явні вирази для коефіцієнтів спінової та масової дифузії, а також коефіцієнта теплопровідності. Для перевірки побудованої моделі проведено порівняння з експериментальними даними, зокрема аналіз залежностей, що спостерігалися в експериментах зі спінової релаксації, та фазового розділення розчинів.

Проведені дослідження дозволили детально розглянути поведінку кварцових камертонів у різних експериментальних умовах, що дало змогу виявити особливості взаємодії їхніх коливань із гідродинамічними модами надплинних розчинів. Зокрема, було досліджено експериментально

спостережувані перший і другий звукові резонанси, що виникають унаслідок взаємодії коливань закритого камертона з середовищем надплинної суміші.

Врахування повного набору гідродинамічних мод системи дозволило запропонувати пояснення незвичайної поведінки резонансів другого звуку, що була зафіксована в експериментах. Було показано, що ця поведінка пов'язана з перерозподілом енергії між дисипативним режимом і режимом другого звуку, що впливає на форму та інтенсивність резонансів.

Крім того, були проведені теоретичні дослідження механізмів дисипації енергії, що проявляються в експериментах із кварцовими камертоном, який коливається в надплинних розчинах ^3He – ^4He з високою концентрацією домішок ^3He . Зокрема, досліджено можливість і ефективність випромінювання камертоном не лише хвилі другого звуку, але й дифузійної дисипативної хвилі, що є специфічною для розчинів ізотопів гелію.

В ході аналізу були знайдені зв'язки між амплітудами коливань температури та концентрації в цих хвилях, а також визначено їхні відносні інтенсивності. Це дало змогу сформулювати фізичне пояснення додаткових механізмів ослаблення коливань камертона в надплинних розчинах, що спостерігалися в експериментальних дослідженнях. Отримані результати відіграють важливу роль для подальшого розуміння механізмів взаємодії акустичних резонансних систем із квантовими рідинами та можуть бути корисними для розробки нових методів прецизійних вимірювань у низькотемпературних фізичних системах.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному: вперше пояснено експериментально спостережуване збудження стоячих хвиль коливань 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. Зокрема, вперше 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.

Вперше отримано явні вирази для коефіцієнтів дифузії, теплопровідності та термодифузії для рідких і твердих розчинів ізотопів гелію. У рамках запропонованого підходу також вдалося визначити явний вираз коефіцієнта самодифузії домішок у твердих розчинах ^3He – ^4He та продемонструвати відповідність розрахункових результатів експериментальним даним.

Вперше, 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.

Вперше доведено, що врахування дисипативної дифузійної теплової хвилі дозволяє пояснити зникнення резонансів другого звуку, які спостерігалися в експерименті. Отримані співвідношення показали, що при певних значеннях параметрів розчину характерні для другого звуку коливання ентропії відсутні, а натомість збуджуються коливання температури та концентрації, що є характерними для дисипативного режиму.

Вперше 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.

Вперше продемонстровано, що знайдений у дисертації механізм одночасного поширення енергії в дисипативній хвилі (за рахунок теплопровідності) та у звуковій хвилі другого звуку може бути використаний для створення нових ефективних методів тепловідведення в наноструктурах.

Ключові слова: теорія конденсованих середовищ, низькі температури, квантові кристали та рідини, коливання тіл і рідин, надплинні розчини, звуки, фазові переходи, дифузія.

ABSTRACT

Herashchenko N.O. Influence of Hydrodynamic Modes on the Oscillations of Bodies in Superfluid ^3He – ^4He Solutions – Qualifying Scientific Work (Manuscript).

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 105 Applied Physics and Nanomaterials (field of knowledge 10 Natural Sciences). – V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The dissertation is devoted to the study of the full set of hydrodynamic modes in pure helium and in superfluid ^3He – ^4He solutions and their influence on heat transfer and oscillations of bodies immersed in helium.

The study of quantum media through observation of oscillating bodies immersed in helium has always been a powerful tool for revealing unique properties of these substances. In recent years, quartz tuning forks have gained particular popularity as universal probes for studying liquid helium at low temperatures. This has been made possible thanks to several important properties of tuning forks, which make them extremely convenient and effective instruments for physical measurements. In particular, they are easily accessible and inexpensive, making them widely usable in scientific research. Moreover, quartz tuning forks are highly reliable, allowing for long-term experiments without the risk of failure or the need for frequent calibration. The simplicity of measurement circuits, low intrinsic damping characteristics, and insensitivity to magnetic fields are also significant advantages enabling precise measurements under complex conditions.

Thanks to their unique properties, quartz tuning forks have become an alternative to vibrating wires traditionally used as standard resonators for studying liquid helium. They significantly simplify the experimental setup, reducing the technical complexity of measurements. However, their use is associated with certain problems caused by both physical peculiarities and the more complex geometry of the forks themselves. This creates difficulties when using them as measurement

devices for studying the parameters of liquid helium. In particular, acoustic effects and dissipative processes significantly influence the measurement results. Furthermore, the high-frequency oscillations of the tuning forks can induce unpredictable phenomena, complicating the achievement of high measurement accuracy in such systems.

To fully utilize the advantages of quartz tuning forks in studying the fundamental properties of superfluid helium isotope solutions, it is necessary to thoroughly investigate their resonance characteristics in liquid helium both theoretically and experimentally. Such studies will allow a deeper understanding of the mechanisms of resonance formation, as well as determine the impact of acoustic and hydrodynamic effects on measurement accuracy in these systems.

The main goal of this work is to investigate the physical mechanisms determining the interaction of hydrodynamic modes (first and second sounds, viscous, diffusion, and thermal waves) with bodies oscillating in liquid helium. In particular, the processes of energy emission and absorption in superfluid solutions are considered; sound resonances in critical helium are studied, and resonance features of first and second sounds in superfluid helium and its isotope solutions are analyzed. The study of these phenomena aims not only to improve methods for measuring properties of liquid helium but also to deepen the understanding of physical processes occurring in these unique materials at low temperatures.

Special attention in the dissertation is paid to the study of superfluid helium isotope solutions and the development of a theory of the full system of hydrodynamic modes of these solutions.

The relevance of these tasks is driven by a significant number of new experimental results obtained by immersing an oscillating quartz tuning fork in superfluid ^3He – ^4He solutions with various ^3He concentrations — from small amounts up to 15%.

These experiments revealed important properties differing from those of pure helium, which are crucial for understanding the physical processes in such systems.

One of the main distinctions of $^3\text{He} - ^4\text{He}$ solutions is the presence of ^3He quasiparticles that exist at any temperature, including regions close to absolute zero. Studying these quasiparticles is important for investigating the physical properties of the solutions.

Another feature of such systems at not very low concentrations is the extremely short interaction time between ^3He quasiparticles, which allows treating them within the hydrodynamic approximation. This assumption is particularly important for solutions with relatively high ^3He concentrations (10 – 15%), where experiments revealed a number of unusual phenomena.

Within this concentration range, oscillations of a solid boundary, such as quartz tuning forks, can excite not only the first sound but also the second sound and generate a thermal wave. This is explained by peculiarities of heat and mass transfer in superfluid $^3\text{He} - ^4\text{He}$ solutions. In particular, concentration and temperature excitations in such mixtures can relax both as second sound waves and as dissipative diffusion waves — a distinct physical process arising from changes in temperature or concentration in similar systems. These phenomena are thoroughly examined in the dissertation, considering their influence on solution dynamics and the potential use of the results to deepen the understanding of heat transfer and other physical processes.

Among such unique phenomena is the so-called second sound — an unusual form of thermal wave propagation in superfluid liquids at low temperatures. This phenomenon is crucial for studying quantum fluids and macroscopic quantum effects.

Unlike ordinary (first) sound, which is an acoustic wave propagated by atomic and molecular vibrations, the second sound is associated with thermodynamic processes and collective motion of the fluid's phase. In this wave, temperature and concentration variations of the fluid's components play the main role. Thus, the second sound represents thermal waves caused by phase separation and a special heat transfer mechanism characteristic of superfluid helium.

In $^3\text{He} - ^4\text{He}$ mixtures, the second sound manifests most strongly at high ^3He concentrations (10 – 15%). Under these conditions, its influence on heat transfer, diffusion, and other physical phenomena becomes particularly noticeable. Studying this effect allows for a deeper understanding of quantum fluids behavior at ultra-low temperatures and promotes the development of new methods for measuring thermodynamic properties of liquid mixtures.

Recently, interest in second sound has grown significantly due to its detection in nanoscale media. Advanced studies of heat transfer in graphene, graphite, and other two-dimensional and layered materials have shown that phonon hydrodynamics, including second sound, has important practical implications. This opens prospects for using phonon hydrodynamic effects to manage thermal balance in modern micro- and nanoelectronic devices.

Experimental results have shown that second sound in solids and liquids can no longer be considered a rare or purely academic phenomenon. In particular, phonon hydrodynamics may affect the performance of graphene and graphite as heat-conducting materials in microelectronics, opening new possibilities for efficient thermal flow management in nanoscale systems.

The dissertation analyzes the fundamental possibility of using second sound for efficient heat removal and its prospects for cooling computing devices.

Another important mechanism is the diffusive dissipative wave, unique to solutions. In superfluid $^3\text{He} - ^4\text{He}$ solutions, unlike pure ^4He , alongside the second sound wave, there appears another purely dissipative mode that also governs the relaxation of temperature and concentration. In this mode, the evolution of temperature and concentration disturbances occurs under the influence of thermal conductivity, thermodiffusion, and mass diffusion of the solution.

The existence of two independent modes responsible for establishing temperature and concentration equilibrium requires their simultaneous consideration when describing various relaxation processes in superfluid $^3\text{He} - ^4\text{He}$ solutions. At the same time, the problem of spatiotemporal evolution of temperature and concentration remains unsolved despite a significant number of experiments in this

area. Moreover, some experimental results still lack satisfactory theoretical explanation, emphasizing the relevance of further research.

For the theoretical description of observed phenomena in pure helium and superfluid solutions over a wide temperature and concentration range, the relaxation problem was solved based on the full system of hydrodynamic equations for ^3He – ^4He solutions. Using Fourier transform, non-Hermitian matrix formalism, and Green's functions, the solution of this system was obtained for an instantaneous point heat source or an initial concentration disturbance. The solution is expressed through Green's functions describing two main relaxation mechanisms: dissipative (due to thermal conductivity, diffusion, and thermodiffusion) and wave-like (due to second sound propagation). As a result, a general solution for the relaxation of an arbitrary initial disturbance on an infinite line was found.

At the next stage, based on the full hydrodynamic system, oscillations of density, temperature, concentration, and pressure were studied to determine the conditions under which solid wall oscillations excite first and second sounds, as well as the dissipative diffusion wave in superfluid helium and acoustic waves in supercritical helium. Calculations of contributions of these processes to resonance formation during oscillations of closed tuning forks were performed.

In particular, experimentally observed excitation of pressure standing waves by the oscillating fork and features of resonance appearance and behavior depending on helium temperature and pressure were considered.

As a result of these studies, a model describing the physical properties of resonance phenomena observed experimentally was created. In particular, resonances arising during oscillations of quartz tuning forks in superfluid helium and its solutions were investigated in detail.

To compare with experimental data, explicit expressions for dissipative coefficients of helium isotope solutions were needed. For this purpose, within the framework of a gas-kinetic model describing a weakly interacting gas mixture of quasiparticles — phonons and impurities — and based on a system of kinetic

equations for these particles, the dissipative properties of both liquid and solid ^3He – ^4He solutions were studied.

The phenomena of mass and spin diffusion, self-diffusion, and thermal conductivity were considered over a wide range of temperatures and concentrations. Special attention was paid to the region where ^3He impurities can be regarded as quasiparticles freely moving through the liquid or crystal, which allowed a significant simplification of calculations and the derivation of analytical expressions for the corresponding transport coefficients. As a result of the calculations, explicit expressions were obtained for the coefficients of spin and mass diffusion, as well as for the thermal conductivity coefficient. To verify the constructed model, comparisons were made with experimental data, particularly analyzing the dependencies observed in experiments on spin relaxation and phase separation of solutions.

The conducted studies allowed a detailed examination of the behavior of quartz tuning forks under various experimental conditions, which made it possible to identify features of the interaction of their oscillations with the hydrodynamic modes of superfluid solutions. In particular, experimentally observed first and second sound resonances arising from the interaction of the closed tuning fork oscillations with the superfluid mixture environment were investigated.

Taking into account the full set of hydrodynamic modes of the system allowed proposing an explanation for the unusual behavior of second sound resonances recorded in experiments. It was shown that this behavior is related to the redistribution of energy between the dissipative mode and the second sound mode, which affects the shape and intensity of the resonances.

Additionally, theoretical studies were conducted on the mechanisms of energy dissipation manifesting in experiments with quartz tuning forks oscillating in superfluid ^3He – ^4He solutions with high concentrations of ^3He impurities. Specifically, the possibility and efficiency of tuning fork radiation not only of the second sound wave but also of the diffusive dissipative wave, which is characteristic of helium isotope solutions, were studied.

During the analysis, relationships between the amplitudes of temperature and concentration oscillations in these waves were found, as well as their relative intensities. This allowed formulating a physical explanation of additional mechanisms of attenuation of tuning fork oscillations in superfluid solutions observed in experimental studies. The obtained results play an important role in further understanding the mechanisms of interaction of acoustic resonance systems with quantum fluids and may be useful for the development of new methods for precision measurements in low-temperature physical systems.

The scientific novelty of the dissertation results consists of the following: for the first time, the experimentally observed excitation of standing waves of pressure oscillations by the tuning fork was explained, and the appearance and properties of resonances depending on helium temperature and pressure were considered in detail. A theoretical model was constructed that describes the physical mechanisms of resonance phenomena observed experimentally. In particular, for the first time, the problem of simultaneous excitation of the first and second sounds in superfluid helium due to the tuning fork excitation of pressure and entropy waves was solved, and experimentally observed dependencies of resonance properties on helium temperature and pressure were explained.

Explicit expressions for diffusion, thermal conductivity, and thermodiffusion coefficients for liquid and solid solutions of helium isotopes were obtained for the first time. Within the proposed approach, an explicit expression for the self-diffusion coefficient of impurities in solid $^3\text{He} - ^4\text{He}$ solutions was also derived, demonstrating agreement between the calculated results and experimental data.

For the first time, by solving the full system of hydrodynamic equations for superfluid $^3\text{He} - ^4\text{He}$ solutions, dispersion relations were found for the first and second sounds as well as for dissipative thermal waves. Relationships between the amplitudes of all hydrodynamic parameters in these modes were determined.

It was shown for the first time that considering the dissipative diffusive thermal wave explains the disappearance of second sound resonances observed experimentally. The obtained relations showed that for certain solution parameters,

entropy oscillations characteristic of the second sound are absent, while temperature and concentration oscillations characteristic of the dissipative mode are excited instead.

Explicit expressions for the amplitudes of concentration and temperature perturbations caused by oscillations of a solid wall in helium were obtained for the first time. Calculations showed that the experimentally observed difference in the attenuation of open and closed tuning forks may be due to the competition between mechanisms of second sound and diffusive waves.

It was demonstrated for the first time that the mechanism found in the dissertation of simultaneous energy propagation in the dissipative wave (due to thermal conductivity) and in the second sound acoustic wave can be used to develop new effective heat dissipation methods in nanostructures.

Keywords: condensed matter theory, low temperatures, quantum crystals and liquids, oscillations of bodies and liquids, superfluid mixtures, sounds, phase transitions, diffusion.