НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ

На правах рукопису

ГЕНЕНКО Юрій Анатолійович

# СТРУКТУРИ МАГНІТНОГО ПОТОКУ ТА ТРАНСПОРТНІ ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОВИМІРНИХ НАДПРОВІДНИКІВ II РОДУ

01.04.22 - надпровідність

А Б Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ - 1995

Роботу виконано в Донецькому фізико-технічному інституті ім. О.О.Галкіна Національної Академії Наук України

Офіційні опоненти : доктор фізико-математичних наук,

Прохоров В.Г.

доктор фізико-математичних наук,
професор Е.А.ПАШИЦЬКИЙ

доктор фізико-математичних наук,
В.М.ЛОКТЄВ

Провідна організація - Фізико-технічний інститут низьких температур НАН України, м.Харків

Захист дисертації відбудеться "27 грудня 1996 р. о 14 годині на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 01.75.02 при Інституті металофізики НАН України (252680, м.Київ-142, просп. Вернадського 36)

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту металофізики за адресою просп. Вернадського 36

Автореферат розіслано "24" листопада 1996 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради Д 01.75.02
к. ф.-м.н., с.н.с. Мадатова Е.Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** В умовах істотного відставання мікротеорії надпровідності (НП) від експерименту, що склалося після відкриття високотемпературної надпровідності (ВТНП) у 1987 році, виявився надзвичайно корисним феноменологічний підхід до опису НП, фіксуючий головні риси їх електро- та термодинаміки.

Мабуть найважливішою рисою ВТНП, що має бути відображена у феноменології, є їх висока анізотропія та шарова структура. Головним структурним елементом ВТНП є надпровідна площина атомарної товщини. Це підтверджується також і надзвичайно малою надпровідною довжиною когерентності $\xi_c \simeq 1A$ у напрямку осі c (перпендикулярно НП шарам). З квазідвовимірністю ВТНП сполук пов'язані також і надії багатьох дослідників на створення теорії мікроскопічного механізму ВТНП.

Феноменологічний підхід до опису шаруватих НП був запропонований задовго до відкриття ВТНП у роботах Лоренця-Доніака (1971) та Булаєвського (1973). У цих роботах шаруватий НП розглядається як система тонких НП площин, пов'язаних слабкими джозефсонівськими зв'язками через тонкі діелектричні прошарки. Розвиток цих феноменологічних уявлень дозволив значно просунутися у розумінні виняткових електромагнітних властивостей ВТНП, що спричинені, крім шаруватої структури, малими НП довжинами когерентності, високою температурою НП переходу та значним впливом флуктуацій.

Новим можливостям для вивчення процесів, що відбуваються у ВТНП, та створенню матеріалів з контрольованими параметрами сприяв останнім часом синтез у багатьох лабораторіях ба-

гатошарових НП структур з НП та діелектричних (металевих, феромагнітних, напівпровідникових) шарів, що чергуються, тобто НП надграток з різноманітними характерними товщинами шарів аж до атомної.

Ця робота присвячена, насамперед, вивченню властивостей ВТНП та надграток, зумовлених квазідвовимірністю НП стану в них. Крім того, значна частина дослідження присвячена класичним низьковимірним об'єктам - тонким НП плівкам та дротам, у яких нерідко бувають досягнені найвищі критичні параметри, істотні для застосувань- критичні поля та струми.

Оскільки у мікроелектронних та макроскопічних застосуваннях надпровідників головна увага приділяється роботі обмежених надпровідних пристроїв та елементів у нерівноважному стані, безумовно **актуальним** є дослідження поведінки низьковимірних (та квазінизьковимірних) НП, через які протікає електричний струм або потік тепла.

**Мета роботи** полягала в послідовному урахуванні взаємодії магнітних вихорів з зовнішньою поверхнею низьковимірних надпровідників II роду або з внутрішніми поверхнями у надпровідних надгратках та шаруватих надпровідниках, а також у вивченні впливу цієї взаємодії на критичні параметри і транспортні властивості цих об'єктів.

**Наукова новизна** роботи визначається значною кількістю нових результатів, одержаних в рамках феноменології надпровідників II роду, які викладені нижче:

I. Розраховано ефективну глибину проникнення магнітного поля, паралельного до шарів, у шаруваті НП середовища з ши-

роким спектром можливих співвідношень між характерними товщинами НП та ізолюючих шарів і глибиною проникнення поля у однорідний надпровідник за умов відсутності слабких зв'язків між НП шарами.

2. Знайдені у лондонівському наближенні точні рішення для квазідвовимірних (2D) вихорів у надгратках з всілякими співвідношеннями між характерними товщинами і глибиною проникнення поля у відсутності слабких зв'язків між шарами.

3. Виявлений 2D-3D кросовер у температурній поведінці критичного струму, що виникає за рахунок подавлення параметра порядку у тонких НП шарах шаруватої системи транспортним струмом під час його протікання перпендикулярно до шарів. Знайдене універсальне (залежне тільки від ступеня анізотропії системи) співвідношення між тунельним струмом та різницею фаз у суміжних шарах,що узагальнює джозефсонівське співвідношення на випадок шаруватих систем.

4. Визначене існування критичного струму подавлення міжшарового зв'язку шаруватої системи, обумовлене лавинною генерацією вільних 2D-вихорів у внутрішніх НП шарах,та знайдена чисельно його тенденція до зникнення вище температури резистивного фазового переходу Березинського-Костерлиця-Таулесса (БКТ) поодинокого НП шару, що є у згоді з уявленням про повне розчеплення НП площин за рахунок 2D флуктуацій при збереженні НП стану у шарах. У резистивних і магнітних вимірюваннях знайдені експериментальні підтвердження реализації такого стану у деяких ВТНП сполуках.

5.Завбачений пік теплопровідності конвективної природи біля температури БКТ-переходу,зумовлений присутністю термічно створених 2D-вихорів (вільних та пов'язаних у пари) у

внутрішніх шарах ВТНП та НП надграток.

6.Винайдено теоретично ефект "магнітної" в'язкості руху джозефсонівських вихорів, паралельних до НП площин шаруватої системи, спричинений процесом намагнічування і релаксації газа термічно створених вихрових петель (пар 2D-вихорів), що має пік також близько температури фазового переходу БКТ.

7. Вирішена точно у лондонівському наближенні проблема проникнення власного магнітного поля транспортного струму у струмонесучий НП циліндр довільного радіуса і визначена неефективність дефектного механізму входження вихорів у тонкі надпровідники,що обумовлює можливість досягнення на них найвищих значень критичного струму.

8. Запропоновано узагальнене правило Сільсбі для входження вихорів у струмонесучий циліндр НП II роду у подовжньому магнітному полі, що визначає еліптичну область бездисипативного стану у координатах струм-поле.

9.Знайдений критичний струм лівоспиральної нестійкості вихорів подовжнього зовнішнього поля з урахуванням їх взаємодії з поверхнею циліндричних або планарних НП зразків та визначені умови, за яких реалізуються нестаціонарні циклічні дисипативні режими з осциляціями подовжнього магнітного моменту та е.д.с.

**Наукова та практична цінність** отриманих результатів полягає в тому, що вони роз'яснюють широке коло питань у фізиці надпровідників, завбачають нові ефекти у їх електромагнітній та тепловій поведінці, у тому числі ті, що мають певний прикладний потенціал. Всі здобуті результати є новими і можуть бути застосовані як для подальшого розвитку фундамен-

тальних уявлень про надпровідники II роду, так і для вирішення конкретних прикладних завдань.

Цінність результатів глав I и II полягає у знаходженні магнітних вихрових структур, що визначають квазідвомірну поведінку НП надграток при всіляких можливих співвідношеннях між характерними товщинами та глибиною проникнення поля.

У III главі теоретично передбачена низка нових ефектів, що можуть мати місце у НП надгратках та ВТНП завдяки присутнім у внутрішніх шарах термічним вихорам,які спричиняють важливі особливості їх електромагнітної та теплової поведінки.

У IV главі отримане рішення класичної проблеми проникнення власного та зовнішнього магнітного поля у струмонесучі надпровідники II роду, що дозволило збудувати практично важливу діаграму резистивної поведінки НП у подовжньому полі.

У V главі показаний вирішальний вплив ефекта лівоспіральної нестійкості вихорів на резистивну поведінку тонких НП дротів та плівок у полі, паралельному до струму, що дозволяє контрольоване створення дисипативних автоколивальних режимів у широкій області значень поля та струму, яке має прикладне значення.

<u>Особистий внесок автора</u> у здобуття оригінальних результатів, що війшли до дисертації, полягає у фізичному і математичному формулюванні задач, виборі і розробці методів їх вирішення, у вирішенні теоретичних проблем, а також у інтерпретації результатів розрахувань і вимірювань та формулюванні висновків.

Усі результати роботи, які виносяться на захист та відзначаються новизною, одержані особисто дисертантом.

**Публікації за темою дисертації.** Матеріали, що війшли до дисертації, опубліковані у 21-й журнальній роботі, перелік яких наведено наприкінці автореферату.

**Апробація роботи.** Основні результати, що війшли до дисертації, було викладено у доповідях та обговорено на Всесоюзних нарадах з ВТНП (ВТНП-III,Харків,1991), фізики магнітних явищ (ФМЯ-19, Ташкент, 1991) та фізики низьких температур (НТ-27, Казань,1992), Міжнародній конференції з кріогенних матеріалів (ICEC-ICMC-14,Київ,1992), Європейській конференції з прикладної надпровідності (EUCAS'93, Goettingen, Germany, 1993), Міжнародному симпозіумі з критичних струмів у надпровідниках (7th IWCC, Alpbach, Austria, 1994), Міжнародній конференції з магнетизму та магнітних матеріалів (MMM-Intermag-94,Albuqerque,USA,1994), Міжнародній конференції з матеріалів та механізмів надпровідності ($M^2S$-HTSC-IV, Grenoble, France,1994), російсько-українсько-германських семінарах з ВТНП (Дубна,1993; Muenchen,1994; Львів,1995), Міжнародній конференції з фізики надпровідності (СФА'95,Харків, 1995).

Роботи з фізики шарових надпровідників [1-8] були відзначені медаллю Академії Наук України та премією для молодих вчених у 1993 р. (тут і нижче посилання стосуються переліку робіт автора наприкінці автореферату).

**Структура дисертації.** Дисертація містить 313 сторінок машинописного тексту і 40 малюнків.Вона складається із вступу, п'яти глав, закінчення, шести додатків та списку літератури з 269 найменувань.

## ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

**Вступ** до дисертації містить загальну характеристику роботи, обгрунтовує її актуальність, формулює тему та мету. В ньому також стисло викладені основні нові результати, що одержані у роботі.

**У першій главі** розглядається екранування магнітного поля у НП надгратках з всілякими співвідношеннями між характерними довжинами.

Надпровідні надгратки, до яких належать високоанізотропні ВТНП та синтетичні багатошарові структури, мають властивість екранування за будь-яких співвідношень між характерними довжинами - НП довжиною когерентності $\xi$, глибиною проникнення магнітного поля у однорідний НП $\lambda$, товщиною НП шарів $d$ та прошарків між ними $D$.

Методом матриці переносу у роботі вперше знайдений вираз для ефективної глибини $\lambda_b$ проникнення магнітного поля, паралельного до шарів, у шарувате НП середовище з довільним співвідношенням між характерними довжинами $D, d$ і $\lambda$ та досить товстими шарами ($D, d \gg \xi$) [3]. Порівняння прямих магнітних вимірювань $\lambda_b$ з параметрами, що витягаються з нелінійних вольт-амперных характеристик, дозволяють виявити фактичну структуру струмопереносу у шарових НП середовищах.

Вирішено дискусійне питання про екранування поля у шаровому середовищі, що складається з тонких НП плівок товщини $d \ll \lambda$, у пірловському описі (тобто при формально нульовій товщині НП шарів), при довільному співвідношенні між $D$ і $\lambda$. За допомогою аналогії з моделлю Кроніга-Пенні у рівнянні

Шредінгера проведене пряме обчислення глибини проникнення поля у таке середовище [19]. У випадку тонких шарів $d, D \ll \lambda$ відтворені відомі результати, здобуті у моделі Лоренця-Доніака для ВТНП.

У другій главі вивчаються квазідвовимірні вихрові утворення у НП надгратках.

Шарова квазідвовимірна структура найбільш анізотропних ВТНП та НП надграток призводить до появлення в них флуктуаційних квазідвовимірних магнітних вихрових утворень та специфічній поведінці тривимірних вихорів Абрикосова, що визначають магнітні та резистивні властивості таких систем. У роботі вперше вивчені квазідвовимірні ефекти у шарових НП середовищах з всілякими співвідношеннями між товщинами НП ($d$) і діелектричних ($D$) шарів та глибиною проникнення магнітного поля у однорідний НП $\lambda$.

Для вивчення квазі-2D вихорів розвинені дві моделі. У першій вивчена магнітна структура вихора у НП пластині довільної товщини $d$, сплющеного через присутність (на відстані $D$) напівнескінчених НП екранів з ефективною глибиною проникнення поля $\lambda_b$ (обчисленою у главі I) [1,2]. У другій моделі розглянутий сплющений вихор, що руйнує НП параметр порядку у одному шарі НП надгратки з довільними $\lambda$, $d$, $D \gg \xi$ [4].

Точне вирішення зазначених моделей у лондонівському наближенні дозволяє визначити такі загальні закономірності:

- у внутрішніх шарах НП надграток з довільними співвідношеннями характерних довжин можлива термічна генерація квазі-2D вихорів, вихрових пар и розпад 3D вихорів на системи квазі-2D вихорів;

– відбувається фокусування магнітного потоку квазі-2D вихора у трубці діаметру $\lambda_b + D$, де $\lambda_b$ – ефективна глибина екранування у шаровому середовищі. У наслідок цього магнітний потік $\Phi$, що протікає через вихор, завжди менший (або набагато менший) від кванта магнітного потоку $\Phi_0$ і дорівнює [1,2]

$$\Phi = \Phi_0 \left[ 1 - \frac{\lambda}{\lambda_b + D + \lambda \, \mathrm{cth}(d/\lambda)} \frac{1}{\mathrm{sh}(d/\lambda)} \right] . \qquad (1)$$

Фізична причина фокусування – утворення дзеркальних відбить – "антивихорів" у ефективному середовищі, що оточує виділену НП пластину. Другий наслідок фокусування поля– це малий магнітний момент квазі-2D вихора при $d, D \ll \lambda$

$$m = \frac{\Phi_0}{2\pi} \left\{ d + \frac{\lambda_b^2 - \lambda^2 + \lambda_b D + D^2/2}{\lambda_b + D + \lambda \, \mathrm{cth}(d/\lambda)} \right\} \to \frac{\Phi_0}{4\pi} (D + 2d) \qquad (2)$$

Малі магнітні моменти спричиняють слабку взаємодію 2D-вихорів у суміжних шарах і, таким чином, можливість "випаровування" 3D-вихорів, тобто їх розпаду на вільні 2D-вихори;

– подібно до вихорів у гелію або гвинтових дислокацій квазі-2D вихори логарифмічно взаємодіють між собою на всіх відстанях на відміну від пірловських вихорів у тонких НП плівках. Власна енергія вихорів, зосереджена у їх розплющених кінцях також залежить логарифмічно від розміру системы R

$$F = \frac{\Phi_0^2}{8\pi^2 \lambda_\perp} \ln\left( \frac{R}{\xi} \right), \qquad (3)$$

де $\lambda_\perp = \lambda^2/d$ – "поперечна" глибина проникнення поля у плівку товщины d. Така поведінка забезпечує можливість здійснення топологічного фазового переходу за сценарієм Березинського-Костерлиця-Таулесса у всіляких шарових НП системах без слаб-

ких зв'язків між шарами.

Одержані результати демонструють можливість створення модельних мезоскопічних шарових систем з параметрами $d \ll \lambda \ll D < \lambda^2/d$, що мають всю низку унікальних електродинамічних властивостей шаруватих ВТНП. Це являється можливим завдяки малого магнітного потоку квазідвовимірних вихорів у таких системах [4]

$$\Phi = \Phi_0 \left\{ 1 - \left[ 1 + \frac{D}{2\lambda_\perp} \left( 1 + (1 + 2\lambda_\perp/D)^{1/2} \right) \right]^{-1} \right\} \to \Phi_0 \left( \frac{D}{2\lambda_\perp} \right)^{1/2} \quad (4)$$

та їх магнітного моменту

$$m = \Phi_0 D/4\pi . \quad (5)$$

У роботі також вивчений 2D-3D кросовер поведінки шаруватої системи з тонкими шарами $d, D \ll \lambda$ (ЛД-модель) за умов протікання струму перпендикулярно шарам. Врахування подавлення НП параметру порядку у шарах транспортним струмом призводить до модифікації джозефсонівських співвідношень між міжшаровим струмом $j_z$ та різницею фаз між суміжними шарами $\chi_n$ до універсальної форми, залежної тільки від ступеню анізотропії системи [11]

$$j_z = j_{co} \left[ 1 - \frac{\tau_{cr}}{2\tau} (1 - \cos(\chi_n)) \right] \sin(\chi_n), \quad (6)$$

де зведена температура $\tau = 1 - T/T_{co}$ ($T_{co}$ – середньополева температура НП переходу), $\tau_{cr} = 1 - T_{cr}/T_{co}$, $T_{cr}$ – температура 2D-3D кросоверу, $j_{co}$ – величина джозефсонівського критичного струму масивного контакту. Фактично така поведінка відображує ефект близькості у шаровій системі, де тунелювання та надпровідність є ефектами однакової вимірности (2D),

**У третій главі** досліджено флуктуаційні ефекти у шарових НП системах зі слабо зв'язаними шарами.

Конкуренція слабких джозефсонівських зв'язків між НП шарами, що призводять до встановлення 3D НП порядку у системі, та квазідвовимірними флуктуаціями, що руйнують 3D порядок, у сильно анізотропних шаруватих ВТНП є на цей час темою гострої дискусії. Головним її питанням є характер резистивного переходу у шаруватих системах і природи НП стану в них. У роботі наводяться аналітичні, чисельні та експериментальні аргументи на користь флуктуаційного розчеплення НП площин, яке дозволяє здійснення резистивного переходу за сценарієм Березинського-Костерлиця-Таулесса. Розглядаються особливості транспортних властивостей шаруватих НП, що виходять з факта термічної генерації у внутрішніх шарах квазідвовимірних вихорів.

З аналітичної точки зору розпад пар 2D-вихорів, народжених термічним шляхом, заборонений через додаткове притягання джозефсонівського походження між вихорами у парі. Це начебто свідчить про заборону резистивної поведінки на кшталт БКТ, бо умовою останньої є розпад пар. Однак відомо, що й сама міжшарова джозефсонівська взаємодія зменшується у присутності 2D-вихорів, як вільних, так і зв'язаних у пари. Якісний та чисельний аналіз самоузгоджених нелінійних рівнянь, що описують згадане перенормування міжшарових зв'язків, виявляє існування критичного струму (паралельного до шарів), вище якого відбувається лавинна генерація вільних 2D-вихорів разом з подавленням міжшарового зв'язку [6].

При низьких температурах цей струм збігається з раніше відомим критичним струмом, характерним для шаруватих систем.

Однак, при зростанні температури відбувається подавлення цього струму, пропорційного силі міжшарового зв'язку, завдяки накопиченню пов'язаних у пари 2D-вихорів. Знайдений чисельно критичний струм має тенденцію до зникнення біля температуры $T_{KT}$ БКТ-переходу поодинокого шару, що є у згоді з ідеєю про повне подавлення міжшарового зв'язку термічними флуктуаціями у високотемпературній області.

Аналіз нелінійних вольт-амперных характеристик (ВАХ) сильно орієнтованих епітаксіальних плівок сполуки YBaCuO виявляє дві області відмінної степеневої поведінки ВАХ - квазідвовимірного типу (при високих вимірювальних струмах) і тривимірного типу (при низьких струмах). Критичний струм кросовера, що відокремлює області різної резистивної поведінки [10] демонструє схожість за порядком величини та якісною залежністю від температури із знайденим теоретично струмом розчеплення НП площин [6].

Іншу можливість спостереження фази з флуктуаційним розчепленням НП шарів надає дослідження монокристалічних зразків сполуки I-2-3 із змінним кисневим індексом x [5,9,20]. При пониженні змісту кисня анізотропія таких сполук зростає експоненціально, досягаючи значень типових для ВТНП сполук на основі Bi і Tl або ж НП надграток. На сполуках $GdBa_2Cu_3O_x$ з x=6.56 и x=6.40 був спостережений такий НП стан кристалів, коли у НП площинах може протікати бездисипативний струм, а у напрямку, перпендикулярному до шарів, НП зв'язок відсутній. При цьому відгук системи на зовнішнє поле, перпендикулярне до шарів, виявляється діамагнітним, а на поле, паралельне до шарів - парамагнітним навіть при найнижчих вимирювальних полях у кілька відсотків ерстеда. Відзначимо, що на відміну

від НП надграток, де кросовер до 2D поведінки досягається значним підвищенням міжшарової відстані, у випадку $GdBa_2Cu_3O_x$ вона лишається близькою до міжатомних відстаней у всьому інтервалі значень x. Це дозволяє інтерпретацію спостереженого явища розчеплення НП площин на відстані $d \propto \xi$, як такого, що має флуктуаційне походження у згоді з якісною картиною, описаною вище. Дослідження ВАХ зразка з $x=6.56$ та флуктуаційних "хвостів" діамагнітної сприйнятливості $\chi$ при высоких температурах [5,9] підтверджує наявність рис переходу БКТ в у цій системі.

Наявність термічних 2D-вихорів (вільних та пов'язаних у пари) у внутрішніх шарах ВТНП та надграток зумовлює специфічні транспортні властивості таких систем. Якщо для звичайних 3D НП типовим є домінуючий конвективный внесок у теплопровідність у змішаному стані за рахунок дрейфу 3D вихорів Абрикосова, що створюються зовнішнім магнитним полем, то у квазідвовимірних шаруватих НП аналогічний конвективный внесок може з'являтися і у відсутності зовнішнього поля. Градієнт температури вздовж шарів спричиняє дрейф 2D-вихорів та їх пар, що призводить до аналогічного переносу транспортної ентропії. Це зумовлює залежний від температури внесок у теплопровідність системи, що має (разом з числом вихорів) пік поблизу температури $T_{кт}$ [7,8], який досягає величини

$$\frac{\Delta^k{}_{max}}{k_{ee}} = \frac{6p}{\pi^3 e}\left(\frac{S_o\rho_n}{k}\right)^2 \frac{1}{R_o^2}\tau_c \cong (1-10)\tau_c \qquad (7)$$

де $k_{ee}$ и $\rho_n$ – електронна теплопровідність та опір відповідно у нормальному стані при $T_{co}$, $p = 1 \div 2$, $S_o$ – питома транспортна ентропія 3D-вихора, характерний опір $R_o = \hbar/e^2 = 4.1$

кОм, k – стала Больцмана. Параметр $\tau_c = 1-T_{кт}/T_{co}$ у високоанізотропних ВТНП на основі Bi та Tl дорівнює 4 $10^{-2}$, а у синтетичних надгратках досягає значення 1, що робить ефект особливо істотним у останньому випадку. На відміну від відомого піку теплопровідності у ВТНП, розташованого у області $T \cong T_{co}/2$, якому нерідко приписують фононне походження, квазідвомірна вихрова особливість є залежною від транспортного струму (будь-якого напрямку), що тече вздовж шарів і впливає на число 2D вихорів, і у такий спосіб може бути ідентифікована.

Здійснення БКТ-переходу у НП шарах может бути також безпосередньо спостережено і при вимірюваннях на струмі,перпендикулярному шарам. У присутності слабкого (але більшого за відповідне нижче критичне поле $H_{c1}$) магнітного поля, паралельного до шарів, формується рідка гратка вихорів джозефсонівського типу. Прикладення струму, перпендикулярного до шарів, викликає рух гратки вздовж шарів. Під час цього руху вихорі гратки поляризують газ флуктуаційно-утворених вихрових петель (пар вихорів). Намагнічування і дальша релаксація останнього призводять до необоротнього розсіяння енергії і виявляються причиною додаткової "магнітної" в'язкості руху вихорів, паралельних до шарів [18]. Цей внесок у в'язкість теж має пік близько $T_{кт}$ і може бути використаний для ідентифікації БКТ-переходу у НП шарах.

**У четвертій главі** вирішена точно у лондонівському наближенні проблема проникнення власного магнітного поля транспортного струму у струмонесучий НП циліндр довільного радіуса R [14]. Знайдена магнітна структура вихрового кільця вла-

сного поля струму, і збудований потенціал Гіббса системи з урахуванням роботи, здійсненої джерелом транспортного струму. Критичною умовою для входження кільцевого вихора з поверхні зразка є зникнення крайового бар'єру для проникнення поля.

Виявилося, що критична густота струму на поверхні, за якою відбувається проникнення першого вихора у зразок, незалежно від його діаметру дорівнює лондонівському критичному значенню $j_L = cH_c/4\pi\lambda$, де $H_c$ – термодинамічне критичне поле. При цьому поле на поверхні зразків великого діаметру дорівнює $H_c$. Таким чином, для макроскопічних зразків НП II роду з ідеальною поверхнею виявляється діючим правило Сільсбі, що було сформульоване, як відомо, для НП I роду.

Для зразків НП II роду, тонких у масштабі глибини проникнення магнітного поля $\lambda$, вирішальним фактором резистивної поведінки стає взаємодія магнітних вихорів з поверхнею зразка. Дійсно, процес виникнення резистивності у реальних струмонесучих НП II роду виявляється істотно залежним від їх поперечних розмірів. У макроскопічних НП дротах з $R \gg \lambda$ при досягненні на поверхні критичної густоти струму $j_{c1} = cH_{c1}/4\pi\lambda$ та власного магнітного поля $H_{c1}$ ширина крайового бар'єра різко зменшується до значень порядку $\lambda$. При цьому вихори можуть проникати у НП на дефектах поверхні розміру $\delta \propto \lambda$, минаючи крайовий бар'єр. Таким чином, величини $j_{c1}$ і $H_{c1}$ мають значення критичних параметрів для дефектного механізму проникнення поля.

У разі тонких зразків залежність ширини крайового бар'єру від струму не містить ніяких характерних значень струму крім $j_L$, що має порядок критичного струму розпарування $10^9$ $A/cm^2$. Дефектний механізм входження вихорів виявляється у

цьому випадку неефективним, і тому на тонких (меньше $\lambda$) зразках НП II роду слід чекати спостереження найвищих значень критичного струму.

Запропонований спосіб спостереження магнітних вихрових кілець за сплеском релаксаційної е.д.с. після пропускання сильного імпульсу транспортного струму. Для цього вирішене точно нелінійне рівняння в'язкого руху інертного колапсуючого вихрового кільця, що було закинуте імпульсом струму через крайовий бар'єр [12].

Вперше вирішена точно в лондонівському наближенні проблема входження вихорів у струмонесучий циліндр НП II роду, влаштований у зовнішньому подовжньому магнітному полі H [13, 16,17]. Знайдена структура спірального магнітного вихора і обчислена його енергія Гіббса з урахуванням роботи, здійсненої джерелами зовнішнього поля та транспортного струму. Визначені параметри оптимального гвинтового вихора, для якого крайовий бар'єр виявляється найменшим і який, таким чином, першим ввійде у зразок. Знайдений залежний від зовнішнього поля критичний струм входження спіральних вихорів $J_c(H)$, за якого зникає крайовий бар'єр.

Знайдена залежність визначає еліптичну область бездисипативного стану ідеального НП II роду у координатах струм-поле. Найбільш наочними є умови початку дисипації у термінах власного поля струму I на поверхні $H_I = 2I/cR$:

$$(\nu H)^2 + (H_I/\nu)^2 = H_c^2 \quad , \qquad (8)$$

де залежний від розміру множник $\nu = I_1(R/\lambda)/I_0(R/\lambda)$, а $I_n$ - модифіковані функції Бесселя. Зважаючи на те, що при $R \gg \lambda$ члени у лівій частині рівняння (8) групуються у квадрат пов-

ного магнітного поля на поверхні $H_f^2 = H_I^2 + H^2$, можна бачити, що для ідеальних макроскопічних зразків умовою бездисипативної поведінки є рівняння $H_f = H_c$. Для реальних зразків з дефектною поверхнею замість $H_c$ у рівнянні (8) постає при $\delta < \lambda$ $H_{c_1}(\lambda/\delta)$, а при $\delta > \lambda$ – $H_{c_1}$. Таким чином, знайдене пряме узагальнення правила Сільсбі на випадок НП II роду, що міститься у зовнішньому магнітному полі, прикладеному паралельно до транспортного струму.

Обчислений критичний струм лівоспиральної нестійкості вихора подовжнього зовнішнього поля з урахуванням взаємодії з поверхнею [17]

$$j_{1n} \cong j_L \frac{2\sqrt{2}\lambda\xi}{R^2} \sqrt{\pi R^2 H/\Phi_0 - 1}\, \exp(R/2\lambda) \quad , \qquad (9)$$

що виявляє область абсолютної нестійкості вихорів $H > \Phi_0/\pi R^2$. Визначені умови реалізації нестаціонарних циклічних дисипативних режимів, раніше спостережених у експерименті, у яких мають місце осциляції подовжнього магнітного моменту та е.д.с. Дисипативні цикли формуються у надкритичній області струмів $j > j_{1n}(H), j_c(H)$ завдяки процесу входження у НП правоспіральних вихорів, їх збіганню і подальшому виходу із зразка нестійких лівоспіральних вихорів, або завдяки більш складному сценарію, що залучає дві чи більше вихрових спіралі. Як і у відсутності магнітного поля, у цьому випадку характерні струми, що визначають бездисипативну область на діаграмі струм-поле, мають порядок $j_{c_1}$ для реальних макроскопічних НП дротів та $j_L$ для тонких низьковимірних НП.

**У п'ятій главі** показано, що на відміну від макроскопічних НП зразків, де спіральна нестійкість поодинокого вихора

відбувається лише при експоненціально великих струмах (8), у низьковимірних НП цей ефект виявляється спостережуваним і радикально впливає на резистивну поведінку у широкій області полів. Особливо значним цей ефект постає у НП плівках, де характерні струми спіральної нестійкості порівнюються з критичними струмами, що зумовлені пінінгом та крайовим (геометричним) бар'єром. Проте, у низьковимірному випадку необхідним є коректне врахування впливу поверхні на стійкість вихрових конфігурацій.

У роботі вперше розглянута стійкість подовжніх магнітних вихорів у струмонесучій плівці НП II роду відносно лівоспіральних збурень. У лондонівському наближенні знайдене точне рішення для спірального вихора у НП пластині довільної товщини та обчислена енергія Гіббса системи [21]. Показано, що за досить великих транспортних струмів вихори подовжнього поля стають нестійкими відносно трансформації у певну ліву спіраль з подальшим виходом із зразка. Критичний струм нестійкості тонкої плівки товщини $d < \lambda$ і ширини $W \gg d$ дорівнює

$$I_{in} = \frac{cWd}{2\lambda} H_{c1}\sqrt{(H-H_d)/2H_{c1}} \quad , \qquad (10)$$

де характерне поле $H_d = \Phi_0/2\pi d^2 - (\Phi_0/\pi\lambda^2)\ln(\lambda/d)$ близьке за значенням до поля проникнення вихора, паралельного до поверхні, у пластину товщини $d$. Легко бачити, що $I_{in}$ вже не є експоненціально великим і порівнюється з критичними струмами порядку $\propto 10^6$ А/см$^2$, що спостерігаються на НП плівках високої якості.

Як і у випадку тонких дротів НП II роду у деякій області полів і струмів можлива циклічна дисипативна поведінка

НП плівок, пов'язана з входженням та нестійкістю індивідуальних спіральних вихрових конфігурацій.

У Закінченні надано перелік та стислу характеристику найважливіших результатів дисертації.

У Додатках А1-А4 доведені деякі загальні формули для обчислення вільної енергії вихорів довільної конфігурації у НП циліндрі та пластині та знайдені вирази для енергії квазідвовимірного, кільцевого і спірального вихорів. У додатках В1-В2 обчислюється розподіл магнітного потоку у квазідвовимірному і кільцевому вихорах.

За результатами дослідження сформульовані

## ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ, ЯКІ ВИНЕСЕНО НА ЗАХИСТ

1.У внутрішніх шарах надпровідних надграток з всілякими співвідношеннями характерних товщин та глибини проникнення магнітного поля можуть реалізуватися квазідвовимірні магнітні вихори, що несуть неквантований магнітний потік і логарифмічно взаємодіють на всіх відстанях.

2.Термічне створення квазідвовимірних вихорів у внутрішніх шарах високоанізотропних ВТНП призводить до флуктуаційного подавлення джозефсонівських зв'язків між надпровідними шарами вище температури переходу Березинського-Костерлиця-Таулесса поодинокого НП шару.

3.Здійснення переходу Березинського-Костерлиця-Таулесса у шаруватій системі має виявитися у вигляді піку теплопровідності вздовж шарів, зумовленого конвекцією флуктуаційних

квазідвовимірних вихорів у відсутності зовнішнього поля, та у вигляді піку в'язкості для вихорів поля , паралельного до шарів.

4.Установлення резистивного стану у струмонесучих надпровідниках II роду в зовнішньому подовжньому магнітному полі (в тому числі нульовому) відбувається за узагальненим правилом Сільсбі: перші спіральні (кільцеві) вихори входять у зразок при досягненні повним магнітним полем на поверхні значення термодинамічного критичного поля.

5.Через неефективність дефектного механізму входження вихорів у тонкі надпровідники досягнення найвищих значень критичного струму близьких струму розпарування спостерігати на дротах з поперечником порядка глибини проникнення магнітного поля.

6.В широкій області значень транспортного струму та зовнішнього магнітного поля, паралельного до струму, резистивна поведінка тонких надпровідних дротів та плівок визначається лівоспіральною нестійкістю індивідуальних магнітних вихорів зовнішнього поля, а у надкритичній області мають реалізуватися циклічні дисипативні режими з осциляціями подовжнього магнітного моменту та напруження.

## ПУБЛІКАЦІЇ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Белевцов Л.В., Гененко Ю.А.,Иванченко Ю.М., Медведев Ю.В. Конфигурация внутреннего вихря в ВТСП // Физ.низк.темп.- 1991- т.17,N 10,с.1239-1243

2. Ivanchenko Yu.M.,Belevtsov L.V.,Genenko Yu.A. and Medvedev Yu.V. Squeezed vortex in layered superconductor //

Physica C -1992- v.193, N 1-3, p.291-302

3. Гененко Ю.А.,Медведев Ю.В. Проникновение магнитного поля в слоистую сверхпроводящую среду // Сверхпроводимость-1992- т.5, N I, с.46-49

4. Гененко Ю.А. Квазидвумерный магнитный вихрь в слоистой сверхпроводящей структуре // Сверхпроводимость-1992-т.5, N 8, с.1402-1408

5. Асадов А.К., Гененко Ю.А., Левченко Г.Г., Маркович В.А., Медведев Ю.В., Фита И.М.,Пащенко А.В. Кроссовер диамагнитного поведения монокристаллов GdBaCuO при изменении кислородного индекса // Сверхпроводимость - 1992 - т.5, N 9, с.1629-1636

6. Genenko Yu.A.,Medvedev Yu.V. Suppression of the critical current in highly anisotropic layered superconductors // Phys.Lett.A - 1992- v.167, N 4, p.427-431

7. Гененко Ю.А.,Медведев Ю.В. Конвективная теплопроводность слоистых высокотемпературных сверхпроводников // Письма в ЖЭТФ- 1992- т.55, вып.7, с.281-284

8. Genenko Yu.A.,Medvedev Yu.V. 2D-fluctuation mechanism of thermal conduction in strongly anisotropic high-Tc systems // Cryogenics- 1992- v.32 - S375-S378

9. Asadov A.K.,Genenko Yu.A.,Levchenko G.G.,Markovich V.A., Medvedev Yu.V,Fita I.M.,Pashchenko A.V. Controllable dimensional crossover of magnetic behavior in single crystal GdBaCuO with variable oxygen contents // Physica C - 1993- v.206, N 1-3, p.119-126

10. Mikheenko P.N.,Genenko Yu.A.,Medvedev Yu.V.,Usoskin A.I., Chukanova I.N. Current-induced decoupling of superconducting planes in oriented YBaCuO thick films // Physica

C- 1993- v.212, N 1-3, p.332-338

11. Гененко Ю.А.,Медведев Ю.В.,Шустер Г.В. Соотношение ток-фаза в слоистых купратах // Письма в ЖЭТФ - 1993-т.57, вып.9, с.705-707

12. Genenko Yu.A. Relaxation of magnetic vortex rings in superconducting cylinder: some universal features//Physica C - 1993 - v.215, N 3-4, p.343-350

13. Гененко Ю.А. Вихревой геликоид в сверхпроводящем цилиндре в продольном магнитном поле // Письма в ЖЭТФ - 1994 - т.59, вып.11, с.807-811

14. Genenko Yu.A. Magnetic self-field entry into a current-carrying type-II superconductor // Phys.Rev.B-1994-v.49, N 9, p.6950-6958

15. Genenko Yu.A. Helical magnetic vortex in a type-II superconductor: an exact solution of an edge barrier problem // Physica C -1994- v.235-240, p. 2709-2710

16. Genenko Yu.A. Helicoidal magnetic vortex in current-carrying superconductor in a longitudinal magnetic field: New exact solution // J.Appl.Phys.-1994-v.76-N 10,p.7144

17. Genenko Yu.A. Magnetic self-field entry into a current-carrying type-II superconductor. II. Helical vortices in a longitudinal magnetic field // Phys.Rev.B- 1995- v.51, N 6, p.3686-3695

18. Гененко Ю.А.,Криворучко В.Н., Медведев Ю.В. Особенности диссипативных свойств квазидвумерных сверхпроводников в области интенсивных флуктуаций фазы параметра порядка // Физ.низк.темп. - 1995 - т.21, вып.4, с.456-458

19. Гененко Ю.А.,Снежко А.В. Экранирующие свойства слоистой среды из пирловских сверхпроводящих пленок // Физ.тверд.

тела - 1995 - т.37, вып.5, с.1545-1547

20. Genenko Yu.A.,Levchenko G.G.,Varyukhin V.N. Influence of magnetic field on AC susceptibility of GdBa2Cu3O(6+$\delta$) single crystals // Physica B - 1995 - 211, p.257-259

21. Гененко Ю.А. Спиральная неустойчивость продольного магнитного вихря в тонкой токонесущей пленке сверхпроводника // Письма в ЖЭТФ - 1995- т.62, вып.5, с.411-416

Genenko Yu.A. Magnetic Flux Structures and Transport Properties of Low-Dimensional Type-II Superconductors.

Thesis for a degree of Doktor Fiziko-Matematychnykh Nauk in the field of superconductivity, subject classification code 01.04.22; Institute of Metal Physics, Kiev, 1995.

21 publications in scientific journals are maintained. The results of theoretical treatment of transport properties of low-dimensional and layered-structure type II superconductors are presented that follows from specific properties of magnetic vortices in these systems. Exact solutions for quasi-two-dimensional, ring ang helix vortices are found for the first time. New effects are predicted in the behavior of critical currents, in the heat conductance and viscosity of vortex motion. The problems of current self-field entry and helical instability in superconducting cylinders and plates are solved that allows to present a diagram of resistive behavior in external field parallel to transport current.

Гененко Ю.А. Структуры магнитного потока и транспортные свойства низкоразмерных сверхпроводников II рода.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.22 -сверхпроводимость, Институт металлофизики, Киев, 1995.

Защищается 21 научная работа,которые содержат результаты теоретического исследования транспортных свойств низкоразмерных и слоистых сверхпроводников II рода, вытекающих из специфических свойств магнитных вихрей в этих системах.Впервые найден ряд точных решений для квазидвумерных,кольцевых и спиральных вихрей. Предсказаны новые эффекты в поведении критического тока, в теплопроводности и вязкости движения вихрей. Решены проблемы вхождения поля (включая собственное поле тока) в токонесущие сверхпроводники и спиральной нестабильности магнитного потока в сверхпроводящих цилиндре и пластине, что позволило построить диаграмму резистивного поведения во внешнем поле, параллельном транспортному току.

Ключевые слова: Критический ток, вихрь, поверхность.

Подписано к печати I5.II.I995 г. Формат 60×84 I/I6.
Уч.-изд.л. I.7. Тираж I00. Зак.5.

---

Донецкий физико-технический институт НАН Украины
Донецк, Р.Люксембург 72. Тел.55-42-05