

В І Д Г У К

офіційного опонента **Касаткіна Олександра Леонідовича**
на дисертаційну роботу **Добровольського Олександра В'ячеславовича**
«Нелінійна динаміка вихорів у надпровідних плівках ніобію
з анізотропними пінінг-наноструктурами»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.22 – надпровідність

Дисертаційна робота О.В. Добровольського присвячена теоретичному та експериментальному дослідженню електродинамічних властивостей наноструктурованих надпровідних плівок у змішаному стані на постійному та змінному струмі.

Головною **метою** даної дисертаційної роботи є встановлення закономірностей у нелінійній динаміці абрикосівських вихорів у плівках ніобію з пінінг-наноструктурами типу пральної дошки у присутності постійного і змінного струмів. Створення штучних наноструктур в матеріалі надпровідної плівки дозволяє керувати динамікою вихорів Абрикосова, створювати умови для їхнього сильного пінінгу (або навпаки – легкого руху) і, таким чином, впливати на електродинамічні характеристики надпровідних плівок на постійному та змінному струмі. Впровадження нанотехнологій для поліпшення електродинамічних характеристик надпровідних матеріалів для їхнього подальшого застосування в електротехніці та електроніці зараз є одним з найбільш важливих напрямків розвитку фізики і техніки надпровідності. Тому тема дисертаційної роботи О.В. Добровольського поза сумнівом є дуже **актуальною**. Поєднання теоретичних досліджень і експерименту для їхньої перевірки, виконані автором вигідно виділяє цю роботу на фоні інших чисто теоретичних або чисто експериментальних дисертаційних робіт.

Відомо, що застосування періодичних пінінг-наноструктур дозволяє впливати на рух вихорів та зменшувати електричний опір і поглинання потужності високочастотного струму у надпровідних плівках. Водночас, на відміну від наноструктур, які застосовуються у роботах інших авторів, **новизна** підходу дисертанта полягає у використанні періодичних наноструктур особливого типу – пінінг-наноструктур типу пральної дошки. Такі наноструктури створюють потенціал пінінгу, який періодичний в одному і постійний у перпендикулярному напрямку, що дає змогу проаналізувати різні режими у динаміці вихорів *аналітично* на основі *точного* розв'язку рівняння Ланжевена для поодинокого вихора. Важливим для пояснення динаміки *ансамблю* вихорів на основі теоретичного опису руху *поодинокого* вихора є застосування геометричного збігу положень вихорів з періодично розташованими каналами пінінг-наноструктур (фрезованими канавками або осадженими нанострічками кобальту). У такому режимі усі вихори рухаються когерентно, що дозволяє не тільки експериментально спостерігати ряд ефектів, які були передбачені теоретично, але на основі розуміння встановлених закономірностей у динаміці вихорів перейти до створення нових приладів, а саме: високочастотного фільтра та флюксонального метаматеріалу з дискретними рівнями поглинання потужності тощо.

Дисертація Добровольського О.В. складається з вступу, огляду літератури, восьми розділів оригінальних досліджень, висновків, додатку і списку використаних джерел. У **першому розділі** проведено огляд літератури за темою дисертації. Представлено короткий опис експериментальних та теоретичних робіт з дослідження нелінійної динаміки вихорів у надпровідниках, встановлено місце проведеного у дисертації дослідження серед вже розв'язаних задач. Наголошується, що головними невирішеними проблемами у динаміці вихорів у наноструктурованих надпровідниках є наступні:

1. Експерименти у присутності високочастотного струму до дисертаційного дослідження проводились тільки для неструктурованих надпровідників. Для наноструктурованих надпровідників експериментів майже не було.

2. Експерименти з наноструктурованими надпровідниками проводилися в переважній більшості робіт у присутності постійного струму, тоді як не було досліджень динаміки вихорів у присутності комбінації постійного і змінного струму.

3. У переважній більшості експериментальних робіт застосовуються наноструктури, які створюють складний потенціал пінінгу. Складність потенціалу пінінгу не дозволяє теоретично проаналізувати резистивний відгук і поглинання потужності у таких зразках.

4. Теоретичний опис динаміки вихорів можливий для особливого типу пінінг-наноструктур – пінінг-наноструктур типу пральної дошки. Проте, відповідних експериментів до дисертаційного дослідження не було.

Автору дисертації вдається розв'язати ці проблеми, як доповідається у наступних розділах. У **другому розділі** досліджується теоретично вплив змінного струму довільної амплітуди і частоти на постійну напругу (так званий ретчет-відгук) і поглинання потужності у надпровідній плівці з косинусоїдальним потенціалом пінінгу типу пральної дошки при скінченних температурах. Така ж геометрія, але для асиметричного потенціалу пінінгу, розглянута в **третьому розділі**, де показано, що конкуренція асиметрії потенціалу пінінгу, яку привносить постійний струм, з внутрішньою асиметрією потенціалу пінінгу призводить до зміни знака постійної напруги (інверсія ретчет-ефекту). Вважаю дуже важливим, що дисертанту вдалося показати, що ретчет-ефект притаманний не тільки системам з оригінально асиметричним потенціалом пінінгу, а і будь-яким системам, де асиметрія потенціалу виникає завдяки зовнішньому впливу, який приводить до схилення симетричного потенціалу. У цьому, зокрема, полягає **фундаментальна значимість** отриманих результатів.

У **четвертому розділі** дисертації наводяться приклади застосування теоретично завбачених ефектів у ряді абрикосівських флюксонних приладів, а саме: високочастотних фільтрах, перетворювачах частоти, генераторах імпульсів і стохастичних підсилювачах. Викладається процедура визначення координатної залежності періодичного потенціалу пінінгу довільної форми з даних про зменшення частоти депінінгу у присутності постійного струму. Ці результати підкреслюють **практичну цінність** дисертаційного дослідження, оскільки містять рекомендації для створення конкретних флюксонних приладів.

У **п'ятому розділі** обґрунтовується вибір надпровідних плівок ніобію з пінінг-наноструктурами типу пральної дошки у якості експериментальної системи. Викладаються експериментальні методи, які застосовувалися для виготовлення і характеристики плівок і наноструктур. Проведені експериментальні дослідження вражають своїм обсягом. У **шостому розділі** досліджується експериментально магніторезистивний відгук плівок ніобію з фрезованими наноканавками. Положення вихорів при полях збігу використовуються для аналізу інтенсивності пінінгу у різних частинах наноструктури за допомогою ареніусівського аналізу температурних залежностей опору. Встановлено, що анізотропний пінінг у зразках домінує над ізотропним, саме що й дає змогу спостерігати нові ефекти у динаміці вихорів у присутності постійного і змінного струмів у сьомому і восьмому розділах.

У **сьомому розділі** представлено кріогенну вставку, за допомогою якої проводилися комбіновані вимірювання електричної напруги і поглинання потужності у присутності постійного і змінного струмів. З присутності і кількості інтерференційних сходинок напруги у вольт-амперних кривих зразків зроблено висновок, що динаміка вихорів при фундаментальному збігу вихорів з наноструктурою відбувається у когерентному режимі. Для цього режиму у **восьмому розділі** досліджується поглинання потужності у присутності постійного струму за нерезонансним методом широкосмугової спектроскопії. Реалізовано високочастотний фільтр, частоту зрізу якого можна переналаштувати не тільки величиною, а й полярністю постійного струму. Виявлено зменшення частоти депінінгу під дією постійного струму. З цих даних визначено координатну залежність потенціалу пінінгу, що являє собою фізичну основу для нового методу неруйнівної характеристики пінінгу у надпровідниках. Створено флюксонний метаматеріал з дискретними рівнями поглинання потужності.

Нарешті, у **дев'ятому розділі** виявлено анізотропію магніторезистивного відгуку, серію магнітних полів збігу та анізотропію критичного струму у плівках ніобію, декорованих наносмужками кобальту. Виявлено надпровідний ефект близькості у нанорозмірних кобальтових структурах. Таким чином, створено основу для досліджень вихорового стану матерії у режимі надпровідності у феромагнітному матеріалі, індукованої ефектом близькості, що матиме значення для надпровідної спінтроніки.

Обґрунтованість та достовірність результатів роботи Добровольського О.В. не викликають сумнівів. Зокрема, всі розрахунки у теоретичній частині роботи проведено за добре апробованими методами теоретичної фізики. Одержані результати є точними розв'язками відповідних нелінійних рівнянь. Теоретичні результати другого і третього розділів дозволили пояснити експериментальні результати роботи В. Jin *et al.*, Phys. Rev. B. **81**, 174505 (2010) у рамках єдиної самоузгодженої моделі. Експериментальні результати погоджуються з окремими випадками, які досліджувалися іншими авторами. Пояснення нових ефектів супроводжується викладенням механізмів їх виникнення. Результати дисертаційного дослідження пройшли апробацію на більш ніж 20 міжнародних конференціях і обговорювалися з ведучими експертами в області динаміки вихорів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що теоретичні результати дисертації дозволяють провести кількісний опис ефектів, що спостерігаються експериментально у надпровідниках з періодичним потенціалом пінінгу. Запропонований метод визначення координатної залежності потенціалу пінінгу з даних про зменшення частоти депінінгу під дією постійного струму є фізичною основою для неруйнівної характеристики пінінгу у надпровідниках. Вдосконалені технології створення пінінг-наноструктур за допомогою фокусованих пучків іонів та електронів являють собою нові безмаскові методи виготовлення наноструктурованих надпровідників. У ході виконання дисертації було створено високочастотні фільтри, які можна переналаштовувати зміною як величини постійного струму, так і його полярності.

Дисертаційна робота містить багато **нових** результатів, які у сукупності **вирішують важливу проблему фізики надпровідності** щодо встановлення закономірностей у динаміці вихорів у надпровідниках з анізотропними пінінг-наноструктурами. Найбільш цікавим серед результатів мені здається створення дискретних рівнів поглинання потужності у флюксоному метаматеріалі, що не доповідалося у науковій літературі дотепер. Також, реалізація високочастотних фільтрів говорить сама за себе. Навіть якщо теоретичні передбачення вдалося втілити експериментально тільки при одній єдиній конфігурації вихрової решітки відносно пінінг-наноструктури, і це призвело до створення принципово нових високочастотних фільтрів, то вже цей один результат є істотним прогресом для надпровідної електроніки. Що стосується структури дисертації, - мені здається досить вдалим викладення результатів резистивних досліджень у надпровідно-магнітних наноструктурах наприкінці роботи. Дисертант створює експериментальну основу для дослідження вихрового стану матерії у ненадпровідних матеріалах у режимі надпровідності, індукованої ефектом близькості – тобто проблеми, яка дотепер не досліджувалася. Нарешті, повертаючись до загального враження від роботи, зазначу, що дисертація викладена послідовно та охайно. Наведено достатню кількість рисунків, які представляють отримані результати.

До дисертаційної роботи я хотів би висловити такі **зауваження**:

1. У розділах 2-4 ретчет-напруга і поглинання потужності аналізуються на основі рівняння Ланжевена для поодинокого вихора, яке розв'язується у термінах матричних ланцюгових дробів. Проте, ані в оглядовій частині дисертації, ані в розділах 2-4 я не знайшов зауваження, чи можна застосувати метод матричних ланцюгових дробів для розв'язку рівняння Ланжевена з урахуванням міжвихрової взаємодії. Вважаю, що такий коментар мав би бути в оглядовій частині роботи.
2. Оскільки в роботі досліджуються тонкі плівки Nb з товщиною меншою ніж глибина проникнення, абрикосовські вихори в таких плівках перетворюються на пірловські, в яких магнітне поле і струм спадають досить повільно (степеневим чином) з ростом відстані від вісі вихору. Тому, на мій погляд, слід було б оцінити,

чи можна в умовах експерименту нехтувати взаємодією між вихорами, а також взаємодією вихору із сусідніми канавками, що створюють наноструктуру пінінгу типу пральної дошки. Питання, власне, полягає в тому, чи можна вважати вихор локалізованим в межах однієї наноканавки.

3. З матеріалу, викладеного у розділі 2, не зовсім зрозумілою є фізична природа осциляцій ретчет-напруги в залежності від амплітуди змінного струму, показаних на Рис. 2.2(b).
4. Нелінійність високочастотного відгуку надпровідних плівкових структур часто пов'язується із входженням всередину плівки (через її краї, із подоланням кураєвого бар'єру) додаткових вихрів, народжених власним магнітним полем високочастотного струму (див., наприклад, D.E.Oates, et. al., J. Supercond. **8**, 725, 1995). Між тим, в даній роботі цим явищем нехтується, і нелінійні ефекти у високочастотному полі, описані в розділах 4,7,8, пов'язуються із нелінійною динамікою фіксованої кількості вихорів в плівці. Слід було б оцінити, наскільки важливим може бути входження додаткових вихорів для розглянутих нелінійних ефектів.
5. Структура і симетрія вихрової решітки у надпровідниках із сильним пінінгом, який описується періодичним потенціалом типу пральної дошки, може істотно відрізнятись від звичайної трикутної вихрової решітки в однорідних надпровідниках. Зокрема, можна очікувати, що вихорі будуть локалізуватись переважно у наноканавках у вигляді щільно упакованих вихрових ланцюжків (принаймні в слабких магнітних полях). Саме така структура вихрової решітки спостерігається у монокристалах ВТНП із двійниками, що грають роль пінінруючих плоских дефектів (див.,наприклад, I.V. Grigorieva, et.al., Physica C **195**, 327, 1992). Цією обставиною в дисертації нехтується, і в розділах 6.8 розглядається звичайна трикутна решітка, яка підстроюється під одновимірний періодичний потенціал пінінгу, створений наноканавками. На мій погляд, слід було б врахувати можливу суттєву перебудову вихрової решітки із виділенням вихрових ланцюжків вздовж наноканавок і відповідну вихрову динаміку у наноструктурованих плівках, з потенціалом пінінгу типу пральної дошки, що досліджуються в даній роботі.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну і високу оцінку дисертації О.В. Добровольського. Без сумніву, дисертація є завершеною кваліфікаційною науковою працею, що побудована на ретельній і великій за обсягом роботі автора. В дисертації отримані нові обґрунтовані наукові результати, які вирішують важливу проблему фізики надпровідності щодо встановлення закономірностей у динаміці вихорів у надпровідних плівках з анізотропними пінінг-наноструктурами. Отримані дисертантом результати і висновки суттєво розширюють існуючі уявлення про динаміку вихорів, зокрема - механізми направленої руху вихорів, ретчет-ефекту та його інверсії у надпровідних плівках з анізотропними пінінг-наноструктурами. Завдяки математичній

універсальності рівняння Ланжевена, яке застосовуються для опису багатьох систем у фізиці і радіотехніці, аналогічні ефекти можна очікувати у динаміці хвиль зарядової та спінової густини, або динаміці магнітних скірміонів у періодичних структурах, тощо. Це обумовлює **фундаментальне значення** отриманих в дисертації результатів. Результати досліджень оприлюднені у 50 наукових працях, серед яких 25 статей у фахових міжнародних журналах, 1 колективна монографія, 1 навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей (з грифом МОН України) і 23 тези у збірниках доповідей міжнародних наукових конференцій. Зміст автореферату вірно і повністю відбиває основні положення дисертації, яка відповідає спеціальності 01.04.22 – надпровідність.

Положення і результати, які були винесені до захисту кандидатської дисертації Добровольського О.В., не виносяться до захисту докторської дисертації.

Оцінюючи дисертацію в цілому, вважаю, що за своїм змістом і обсягом, актуальністю тематики, обґрунтованістю і достовірністю висновків, новизною одержаних результатів та їх науковим і практичним значенням дисертація Добровольського О.В. «Нелінійна динаміка вихорів у надпровідних плівках ніобію з анізотропними пінінг-наноструктурами» задовольняє вимогам до докторських дисертацій, зокрема пп. 9, 10, 12 положень "Порядка присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника", а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.22 – надпровідність.

Офіційний опонент –
доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник відділу
надпровідності Інституту металофізики
імені Г. В. Курдюмова НАН України

Касаткін О.Л.

Підпис доктора фізико-математичних наук
Касаткіна О.Л. засвідчую.

Вчений секретар
Інституту металофізики
імені Г. В. Курдюмова НАН України
кандидат фізико-математичних наук



Кочелаб Є.В.