

ВІДГУК

офіційного опонента **Ямпольського Валерія Олександровича**
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 Добровольського О.В. присвячена теоретичному і експериментальному дослідженню динаміки вихорів у надпровідних плівках ніобію з періодичними пінінг-наноструктурами типу пральної дошки. Такі наноструктури створюють періодичний потенціал пінінгу для абрикосівських вихорів і через це дають змогу керувати динамікою вихорів і, отже, контролювати резистивний відгук надпровідника. Це має велике значення для надпровідних трансмісійних ліній і сучасних флюксонних приладів, а саме фільтрів, резонаторів тощо, і є однією з можливих передумов для створення квантових комп'ютерів. Таким чином, тема дисертаційного дослідження є безумовно **актуальною**.

Однією з найважливіших проблем у фізиці вихорового стану надпровідників є відсутність розуміння, як входні параметри (величина постійного струму, амплітуда і частота змінного струму) і термодинамічні величини (температура і магнітне поле) впливають на резистивний відгук наноструктурованих надпровідників. Таке розуміння відсутнє на цей час завдяки складності форми потенціалів пінінгу, які індуюються наноструктурами і, як наслідок, складності створення теоретичного опису динаміки вихорів у надпровіднику з потенціалом пінінгу довільної форми.

Висновки і положення, які виносяться до захисту дисертантом, є **оригінальними і новими**. Не повторюючи основні тези, які вичерпно викладені у висновках дисертації і автореферату і зазначені також в їх вступних частинах, вважаю необхідним навести тут декілька найважливіших рис даної дисертаційної роботи:

1. Дуже обмежена кількість дисертаційних робіт базується одночасно на оригінальних теоретичних і експериментальних результатах. Дана дисертація – це той рідкий випадок, коли *розвиток теорії відбувався пліч-о-пліч з проведенням експерименту*, теоретичні завбачення перевірялися експериментально не тільки іншими авторами, але і самим дисертантом, а нові ефекти, які спостерігалися експериментально, стимулювали подальший розвиток теорії.

2. На відміну від існуючих робіт, у дисертації вперше системно досліджується динаміка вихорів у надпровідних плівках з пінінг-наноструктурами особливої форми – типу пральної дошки. Завдяки періодичності потенціалу пінінгу у таких надпровідниках рівняння руху поодинокого вихора вдається *розв'язати аналітично і одержати точні вирази* для електричної напруги і поглинання потужності у зразку. Це дає змогу вперше пояснити цілу низку нових ефектів, які експериментально спостерігалися як іншими авторами, так і самим дисертантом.
3. Для створення наноструктур типу пральної дошки у дисертаційній роботі вперше застосовуються такі *безмаскові нанотехнології*, як фрезування поверхні плівки фокусованим пучком іонів та осадження на поверхню плівки наносмужок феромагнітного матеріалу (кобальту) під дією фокусованого пучка електронів. При цьому застосування цих технологій вдосконалюється, і досліджується також вплив самого процесу обробки надпровідника на його електричні транспортні властивості у нормальному стані.
4. До останнього часу дослідження динаміки вихорів у надпровідниках проводилися для надпровідників без наноструктур. Водночас, динаміка вихорів у наноструктурованих надпровідниках майже ніколи не досліджувалася у присутності комбінації постійного і змінного струмів. Дисертант побудував складне високочастотне криогенне устаткування для комбінованих вимірювань електричної напруги і поглинання потужності у надпровідних плівок за методом широкосмугової спектроскопії, яке надало змогу *поєднати у своїх дослідженнях ці два експериментальні напрямки*, які до останнього часу розвивалися майже незалежно один від одного.
5. У переважній більшості випадків під вихровими речетами у літературі розуміються системи, які характеризуються "власним" асиметричним потенціалом пінінгу (хитні речети). Важливою рисою даної дисертації є пояснення, що навіть якщо "власний" потенціал пінінгу у системі є симетричним, то присутність постійного струму призводить до його ефективної асиметрії (*схилений речет*).
6. Вирішальним для порівняння теоретичних завбачень з експериментальними результатами є геометричний збіг положень вихорів з каналами потенціалу пінінгу. У такому випадку рух вихорів стає когерентним і динаміку усього вихрового *ансамблю* можна інтерпретувати у термінах руху *поодинокого* вихора у періодичному потенціалі пінінгу. Концептуально це є ключовим пунктом порівняння експерименту з теорією.
7. Розв'язок рівняння Ланжевена у термінах матричних ланцюгових дробів вражає своєю елегантністю. Цікаво, що у своєму оригінальному варіанті цей метод використовувався для одновимірного руху частинки у схиленому періодичному потенціалі, а у дисертації

такий метод дозволяє розв'язати рівняння Ланжевена у двох вимірах і для випадку асиметричного потенціалу з довільним параметром асиметрії. У свою чергу, результати, які доповідаються у дисертації для динаміки вихорів, можуть "підказати" нові ефекти в інших системах, еволюцію яких також можна описувати на основі рівняння Ланжевена (наприклад, рівняння для різниці фаз у джозефсонівському контакті шунтованому опором). Це підкреслює *фундаментальну значимість* проведених досліджень.

8. Восьмий розділ дисертації містить найбільш сильні фундаментально нові результати, які дуже важливі для флюксоонних приладів. Реалізація високочастотних фільтрів з частотою зрізу, яку можна переналаштовувати як величиною, так і полярністю постійного струму, тут доповнюються визначенням координатної залежності потенціалу пінінгу з даних про зменшення частоти депінінгу у присутності постійного струму. Після з'ясування особливостей у високочастотній динаміці вихорів дисертант переходить від аналізу ефектів до синтезу нових функціональностей, що яскраво вдається на прикладі флюксоонного метаматеріалу з дискретними рівнями поглинання потужності.
9. Нарешті, вважаю дуже цікавими експериментальні результати останнього розділу, які закладають основу для досліджень вихрового стану матерії у ненадпровідних нанорозмірних гетероструктурах у режимі надпровідності, індукованої завдяки ефекту просторової близькості.

Достовірність і обґрунтованість результатів і висновків дисертації не викликають сумніву. Ретельний аналіз експериментальних даних проводився у тісній співпраці з науковим консультантом дисертанта – професором Шкловським В.О. – фізиком-теоретиком з міжнародним ім'ям і майже 40-річним досвідом аналізу експериментальних даних в області фізики вихрового стану. Окремі експериментальні результати роботи знаходять підтвердження у роботах інших груп, а у теоретичній частині роботи виконуються граничні переходи до раніше відомих результатів інших авторів. Таким чином, достовірність як теоретичних, так і експериментальних результатів та їх коректна інтерпретація не викликають сумніву.

Практична значимість отриманих результатів полягає у наступному. Результати дисертаційного дослідження можна характеризувати наступним чином:

1. *Матеріали*. Виявлені умови напилювання плівок ніобію у чистому надпровідному режимі методом магнетронного розпилювання на постійному струмі. Такі плівки

цікаві для досліджування надпровідності і особливостей електронного транспорту, оскільки довжина вільного пробігу електронів в них більша, ніж надпровідна довжина когерентності. На цей час існує небагато матеріалів, плівки яких характеризуються чистим надпровідним режимом.

2. *Наноструктури.* Створено наноструктури типу пральної дошки. Їх унікальність полягає як в тому, що виготовлені вони з застосуванням сучасних безмаскових нанотехнологій – фрезуванням поверхні плівки фокусованим пучком іонів і осадженням на поверхню плівки феромагнітних смужок кобальту, так і в тому, що асиметричні, квазі-тривимірні ретчет-наноструктури добре відповідають модельній системі, для якій рівняння Ланжевена для вихора має точний розв'язок при довільних величинах постійного струму, амплітуди і частоти змінного струму та температури.
3. *Ефекти.* Пінінг, гайдінг, ретчет-ефект та його інверсія являють собою основні "інструменти" для керування динамікою вихорів у наноструктурованих надпровідниках. У ході виконання дисертації з'ясування впливу кожного з параметрів на резистивний відгук надпровідника дозволяє контролювано застосовувати ці ефекти у надпровідних флюксоонних приладах, таких як стохастичні підсилювачі, перетворювачі частоти, модулятори і генератори імпульсів. Використання асиметричних пінінг-структур у надпровідних трансмісійних лініях вже знайшло застосування у високочастотних фільтрах і флюксоонних метаматеріалах, які були створені у ході виконання дисертаційного дослідження.
4. *Методи.* У дисертаційній роботі були розвинуті і вдосконалені нові методи досліджень. А саме, було створено кріогенне високочастотне устаткування для проведення комбінованих вимірювань електричної напруги і поглинання потужності за методом широкосмугової спектроскопії. Важливим прикладним результатом є розробка основ і тестування нової неруйнівної методики характеристики пінінгу у надпровідниках на основі даних про зменшення частоти депінінгу у присутності постійного струму.

Результати дисертаційного дослідження **оприлюднені у 50 наукових працях** дисертанта, у тому числі 25 статтях у провідних міжнародних журналах, 1 колективній монографії, 1 навчальному посібнику для студентів фізичних спеціальностей (з грифом МОН України) і 23 тезах доповідей у збірниках праць міжнародних наукових конференцій. У публікаціях відображено всі основні положення дисертації, які винесено до захисту. **Автореферат дисертації Добровольського О.В. відповідає змісту дисертації і повністю відображає всі результати, положення і висновки, що виносяться до захисту.**

В цілому, робота оформлена охайно і справляє гарне враження. В оглядовій частині роботи дається суттєвий за змістом та обсягом зріз сучасної літератури. В оригінальній частині роботи автором проведено серйозне дослідження проблеми, розв'язано три глобальні задачі, з яких одна пов'язана з теоретичним аналізом ретчет-ефектів та їх використанням у флюксоонних приладах (розділи 2-4), друга пов'язана з дослідженням направлено руху (гайдінгу) вихорів у двох різних системах (розділи 6 і 9) у присутності постійного струму, а третя полягає у дослідженні динаміки вихорів у присутності комбінації постійного і змінного струмів (розділи 7 і 8). Безсумнівно, що дисертаційна робота Добровольського О.В. є завершеною науково-дослідницькою роботою як за змістом, так і за обсягом. Але, як у будь-якій роботі, у дисертації є декілька **недоліків**, на які я хотів би звернути увагу:

1. Аналіз координатної залежності потенціалу пінінгу з даних про поглинання потужності базується на узагальненій моделі Джительмана-Розенблюма, яка справедлива для випадку нульової температури. У восьмому розділі дисертації ця модель застосовується для інтерпретації експериментальних даних при температурі $T \approx 0.3T_c$, де $T_c \approx 8.5$ К – температура переходу півки до надпровідного стану. Відомо, проте, що при дуже низьких температурах квантові ефекти (тунелювання вихора) можуть стати значними, і розгляд руху вихора як класичного об'єкту у потенціалі пінінгу може стати неадекватним експериментальній ситуації. Тому бажано було би провести аналіз і знайти умову для температури, яка би відповідала режиму, коли квантові ефекти стають важливими для систем, які досліджуються.
2. У більшості розділів розглядається геометрія, коли струм прикладається вздовж каналів потенціалу пінінгу, а вихори рухаються перпендикулярно до них. Бажано було би проаналізувати критерій строгості напрямку руху вихорів поперек каналів потенціалу пінінгу у такому випадку.
3. При ознайомленні читача з ретчет-ефектом в оглядовій частині роботи цікаво було би побачити згадування ролі кольору шуму для виникнення ретчет-ефекту.

Зазначені зауваження не стосуються основних результатів роботи і не впливають на загальну позитивну високу оцінку дисертації Добровольського О.В.

Загальний висновок. Дисертація є завершеною кваліфікаційною науковою працею, що побудована на ретельній і великій за обсягом роботі. Отримані дисертантом результати і висновки суттєво розширюють існуючі уявлення про механізми динаміки вихорів, направлено руху вихорів, ретчет-ефект та його інверсії у надпровідних півках

з анізотропними пінінг-наноструктурами. У цьому полягає фундаментальне значення отриманих в дисертації результатів.

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 "Порядку 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.

Доктор фізико-математичних наук,
член-кореспондент НАН України, професор,
завідувач відділу теоретичної фізики
Інституту радіофізики і електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України



Ямпольський В.О.

Підпис завідувача відділу Ямпольського В.О. засвідчую.
Вчений секретар ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України,
кандидат фізико-математичних наук



Почаніна І.Є.