

ВІДГУК
офіційного опонента
на роботу Реви Владислава Валерійовича
**«СТАТИСТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМ ФЕРОМАГНІТНИХ
НАНОЧАСТИНОК З ВМОРОЖЕНИМИ МАГНІТНИМИ МОМЕНТАМИ»**
щодо присудження наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю
01.04.02 – “теоретична фізика”

Дисертаційна робота Реви В.В, присвячена теоретичному і чисельному дослідженню відгуку ансамблів феромагнітних наночастинок, завислих у рідині, на зовнішні періодичні поля з врахуванням дипольної взаємодії та термостату. Теоретичне вивчення властивостей ферорідини та колективних ефектів під зовнішнім впливом, вбачається **актуальним** для ґрунтового аналізу та опису фізичних процесів, що протікають в таких системах. По-перше, це зумовлено інтересом с точки зору врахування статистичного характеру оберտального руху феромагнітних наночастинок, як з точки зору визначення потужності втрат, так і з точки зору статистичних характеристик оберտального руху. По-друге відгук ансамблю на зовнішню дію може суттєво різнитися залежно від параметрів як самого ансамблю, так і зовнішнього поля і тому для розуміння цього впливу необхідно класифікувати всі можливі види руху та вивчити макроскопічну природу поглинання енергії для кожного з них.

Також слід зазначити, що **актуальність** досліджень Реви В.В. підтверджується тим, що вони виконані в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: “Аномальні дифузійні та релаксаційні властивості класичних та квантових блукань з неперервним часом”, за підтримки МОН (№ 0112U001383, 2012 – 2014 рр.); “Магнітні, теплові та транспортні властивості періодично збуджених систем феромагнітних наночастинок”, за підтримки МОН (№ 0116U002622, 2016 – 2018 рр.); “Спрямований транспорт та дисипація енергії в системах феромагнітних наночастинок і магнітних скірміонів”, за підтримки МОН (№ 0119U100772, 2019 – 2021 рр.). А також індивідуального гранту європейської програми Eminence II, Erasmus Mundus “Properties of the systems of ferromagnetic fine particles with frozen magnetic moments”, в Університеті Адама Міцкевича, м. Познань, Польща.

Дисертаційна робота складається з п’яти розділів, перший з яких становить огляд літератури, узагальнюючих висновків та переліку літературних джерел.

Перший розділ «Феромагнітні наночастинок та феромагнітні рідини: властивості, застосування та модельний опис» являє собою огляд літератури, в якому узагальнені результати літературних джерел що присвячені дослідженню властивостей систем феромагнітних наночастинок, що взаємодіють із зовнішнім періодичним полем, з термостатом та поміж собою завдяки диполь-дипольній взаємодії. Зазначено брак отриманих результатів стосовно залежності енергії магнітного поля, що поглинається наночастинками під час вимушеного обертання,

від параметрів системи. Спираючись на проведений аналіз, було сформульовано основні завдання дослідження.

У **Другому розділі** «Модель наночастинки з вмероженим магнітним моментом: основні рівняння» будується методологія дослідження, зокрема описується базова модель наночастинки, стохастичні рівняння обертального та поступального руху. Записується рівняння Фокера-Планка за допомогу, якого знаходяться ефективні рівняння для подальших аналітичних та чисельних розрахунків. Реалізується чисельна процедура для моделювання великих ансамблів наночастинок.

Третій розділ «Взаємодія наночастинки з вмероженим моментом із зовнішнім періодичним полем: аналітичні результати» присвячений дослідженню детерміністичного та стохастичного випадків вимушеного обертального руху під дією лінійно-поляризованого та циркулярно-поляризованого полів. Отримуються аналітичні вирази для обертальних траєкторій наночастинки та енергії зовнішнього поля, що поглинається наночастинкою у високочастотному наближенні. Аналізується температурні залежності потужності втрат для різних амплітуд і частот поля. Порівнюються результати аналітичних та чисельних розрахунків.

Четвертий розділ «Ансамбль наночастинок з вмероженим моментом: результати моделювання з урахуванням взаємодії» присвячений впливу колективних ефектів. Спочатку аналізуються рівноважні властивості ансамблів феромагнітних наночастинок. За допомогою чисельного моделювання, розраховується магнітна сприйнятливості та первинне намагнічування ансамблю залежно як від параметрів системи, так і від граничних умов, або від форми посудини, де знаходяться наночастинки. Демонструється, що властивості ферорідини значною мірою визначаються характером кластерів, що утворюються внаслідок дипольної взаємодії. Досліджується вплив взаємодії на сприйнятливості ансамблів до зовнішніх періодичних полів залежно від параметрів поля та середовища. Описується ефект, коли взаємодія між частинками та тепловий шум є конкуруючими факторами, та конструктивна роль шуму, яка полягає у збільшенні енергії поглинання за рахунок теплових флуктуацій.

П'ятий розділ «Спрямований транспорт періодично збуджених феромагнітних наночастинок, індукований силою Магнуса в рідкій матриці» містить аналітичний та чисельний опис дрейфу феромагнітних наночастинок під дією сили Магнуса. Отримується аналітичні результати середньої швидкості дрейфу частинки для планарної моделі та загального випадку. За допомогою моделювання перевіряються аналітичні результати та досліджуються температурні ефекти в дрейфовому русі. Зокрема, встановлено умови, за яких зміна температури призводить до зміни напрямку дрейфу наночастинок на протилежний.

Знайомство з результатами основних змістових розділів дисертації дозволяє сформулювати положення, які визначають **найбільш важливі результати та наукову новизну роботи:**

1. У детерміністичному наближенні вперше отримано: аналітичні вирази для обертових траєкторій наночастинки, що збуджується лінійно-поляризованим полем в усьому спектрі амплітуд і частот; аналітичні вирази для обертових траєкторій під час дії полів усіх типів у високочастотному наближенні; аналітичні вирази для енергії зовнішнього поля, що поглинається наночастинкою.

2. Вперше отримано асимптотичні вирази для полярного кута та чисельні дані для середньої швидкості обертання під час вимушеного руху під, що збуджується циркулярно-поляризованим полем. Вперше проаналізовано температурні залежності потужності втрат для різних амплітуд і частот поля.

3. Вперше досліджено конкуруючий вплив теплового шуму та дипольної взаємодії на енергію змінного поля, яку поглинає ферорідина. Показано, що різниця між детерміністичним та стохастичним випадком є суттєвою для малих частот, однак з ростом частоти стає незначною. Вперше доведено, що даний ефект має детерміністичне походження та пов'язаний з тим, що з ростом частоти відгук наночастинки на зовнішнє поле формується незначним коливальним рухом намагніченості наночастинок навколо власних рівноважних положень.

4. Вперше встановлено існування умов, за яких у досліджуваній системі спостерігається конструктивна роль шуму, що полягає у збільшенні енергії, що поглинається зі зростанням температури внаслідок руйнування впорядкування у кластерах наночастинок та перехід окремих наночастинок з одного квазірівноважного стану до іншого.

5. Вперше отримані залежності середньої швидкості дрейфу феромагнітних наночастинок під дією ефекту Магнуса від розміру наночастинок, початкової фази змінного поля, що діє на наночастинку, та температури. Встановлені умови, при яких зміна температури призводить до зміни напрямку дрейфу наночастинок на протилежний.

Результати теоретичного опису статистичних властивостей систем феромагнітних частинок мають **практичне значення** пов'язане з застосуванням для вдосконалення та формулювання конкретних технічних рекомендацій до ферорідин у магнітній гіпертермії – сучасному і перспективному методі терапії раку з мінімальними побічними ефектами. Результати можуть бути спрямовані на підвищення керованості процесу нагрівання та пошук оптимального балансу з точки зору ефективність-безпека. Також результати дослідження дозволять сформулювати вимоги до феромагнітних наночастинок антирадарних покриттів, буди використані у приладах та методах для прецизійної сепарації наночастинок за їх розміром.

Достовірність і обґрунтованість наукових результатів та висновків дисертаційної роботи забезпечується використанням загальноприйнятних методів дослідження, а також кореляцією одержаних чисельних та аналітичних результатів. Достовірність результатів підтверджується також високим рівнем оприлюднення отриманих результатів рецензованих міжнародних журналах на-

укових журналах як Physical Review E та Computer Physics Communications, що входять до загальносвітових рейтингів та мають високий імпаکت-фактор.

Дисертаційна роботи виконана на високому науковому рівні. Разом з тим вважаю за необхідне висловити певні зауваження до роботи:

1. У підрозділі 2.2 «Технології числового моделювання» описуються комп'ютерні алгоритми моделювання на різному обладнанні, що не є областю досліджень за спеціальністю «теоретична фізика». Такий матеріал, на мою думку, повинен бути поданий у додатку в стислій формі з лістингом програм.
2. У п'ятому розділі присвяченому транспорту феромагнітних наночастинок під впливом ефекту Магнуса, приведені результати слабо пов'язані з результатами попередніх розділів. Потрібне підсилення аргументів, чому даний розділ був включений до даного дисертаційного дослідження.
3. Зважаючи на практичний потенціал отриманих чисельних результатів, було б бажаним не обмежуватися використанням лише безрозмірних величин, але й навести конкретні чисельні дані для наночастинок з конкретними розмірами та складом. Також у цьому ключі було б бажаним порівняння отриманих результатів з експериментом.

Вказані зауваження не ставлять під сумнів загальну позитивну оцінку дисертації Реви Владислава Валерійовича, не знижують її високого рівня, та мають характер побажань для майбутніх досліджень. Результати досліджень повною мірою висвітлені у 21-ій науковій праці, з яких п'ять статей у виданнях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science. Зміст автореферату є ідентичним до змісту дисертації. На підставі аналізу мети дослідження, актуальності роботи її змісту, достовірності та обґрунтованості результатів, можна зробити висновок, що дисертація є завершеною науковою працею, містить нові та практично корисні результати та цілком задовольняє вимогам п.п. 9, 11, 13 і 14 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Інституту прикладної фізики НАН України,
провідний науковий співробітник
відділу «Моделювання радіаційних ефектів
та мікроструктурних перетворень у
конструкційних матеріалах».

Учений секретар
Інституту прикладної фізики НАН України



В. О. Харченко

О.І. Ворошило