

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна
професору Сергію ЛИТОВЧЕНКО
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, професора кафедри прикладної математики та моделювання складних систем Сумського державного університету МОН України Хоменка Олексія Віталійовича на дисертаційну роботу Шимановського Андрія Романовича «Симетрія, консолідація, модульовані структури параметру порядку», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

1. Актуальність теми дисертації.

Дисертаційна праця Шимановського А. Р. з тематики критичної поведінки та фазових перетворень в упорядкованих конденсованих середовищах є одним із фундаментальних напрямків сучасної фізики твердого тіла. Особливе місце тут посідає вивчення систем із просторово-неоднорідним розподілом параметра порядку (ПП). Розуміння механізмів еволюції та стабільності таких структур поблизу мультикритичних точок та точок Ліфшиця має вирішальне значення, оскільки властивості речовини у критичній області суттєво відрізняються від її поведінки далеко від точок фазових переходів.

Традиційні феноменологічні підходи, засновані на теорії Ландау, хоч і мають високий ступінь загальності, потребують розширення через врахування вищих градієнтів та нелінійностей для адекватного опису

реальних систем. Більше того, існує очевидний розрив між фундаментальними теоретичними моделями та складними нерівноважними процесами, що відбуваються у матеріалах за умов жорсткого зовнішнього (зокрема, радіаційно-термічного) впливу. Цим зумовлена необхідність подальшого розвитку теоретичних уявлень про поведінку несумірних структур в поляризованих середовищах з однокомпонентним параметром порядку, що потребує побудови нових теоретичних моделей, які описують в рамках одного підходу властивості та температурну еволюцію просторово-неоднорідних станів в усьому інтервалі існування несумірної фази, зокрема поблизу точки фазового переходу із несумірної фази в поляризований стан. У цьому контексті дисертаційна робота А. Р. Шимановського, яка поєднує глибокий симетрійний та варіаційний аналіз нелінійних моделей із розв'язанням прикладних матеріалознавчих задач (на прикладі молібдену та полімерних сполук), є надзвичайно актуальною та своєчасною.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано в Навчально-науковому інституті «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна відповідно до тематичних планів фундаментальних науково-дослідних робіт та угод про науково-технічне співробітництво з установами НАН України.

3. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень.

Високий ступінь достовірності результатів забезпечено коректним використанням фундаментальних методів теоретичної фізики: варіаційного принципу для функціоналів вільної енергії та теоретико-групового (симетрійного) аналізу нелінійних диференціальних рівнянь. Для прикладної частини роботи достовірність підтверджується застосуванням взаємодоповнюючого комплексу сучасних експериментальних методик: рентгеноструктурного аналізу, електронної мікроскопії та дюрOMETричних

випробувань, що забезпечило надійну верифікацію теоретичних висновків. Одержані в роботі наукові результати мають чітку наочну фізичну інтерпретацію та не суперечать уявленням фізичного матеріалознавства. Основні положення та висновки дисертаційної роботи добре відповідають змісту одержаних результатів і є достатньо обґрунтованими.

4. Наукова новизна одержаних результатів.

Наукова новизна результатів дисертації є комплексною і полягає у такому:

1. Показано, що спонтанне порушення парності для скалярних параметрів порядку як функцій координат виступає механізмом виникнення просторово-модульованих фаз із різною симетрією; виявлено нову неперіодичну вироджену солітонну фазу. Перевагою такого підходу, є поширення теорії Ландау фазових перетворень на випадок існування просторово-неоднорідних станів однокомпонентного параметра порядку та можливості опису нелінійних властивостей модульованих станів адже розподіли параметра порядку є суттєво нелінійними функціями. В принциповому плані вони відтворюють найважливіші властивості несумірної фази, зокрема, така властивість, як збільшення внеску вищих гармонік у хвилю несумірної модуляції при пониженні температури до точки фазового переходу в сумірну фазу.

2. Знайдено нові класи точних аналітичних розв'язків нелінійних варіаційних рівнянь для термодинамічного потенціалу з вищими порядками, сформульовано чіткі критерії їхньої інтегрованості та термодинамічної стійкості. Запропоновано модель, що описує температурну поведінку несумірних структур параметра порядку поблизу точки фазового переходу в сумірну фазу. Побудовано графічні залежності, що допускаються варіаційним рівнянням задачі, детально вивчено їх симетрійні властивості та можливості їх використання для опису різноманітних станів, що мають місце у поляризованих середовищах.

3. Отримано нове теоретичне пояснення трансформації структурних неоднорідностей у молібдені за умов інтенсивного опромінення через призму гідродинамічних ефектів типу Бенара-Марангоні. Дані результати мають також практичне значення, оскільки відкривають можливості застосування сильнострумових релятивістських електронних пучків для модифікації поверхні тугоплавких матеріалів та тестування їх стійкості до дії екстремальних зовнішніх чинників. Останнє є важливим для обґрунтування вибору матеріалу для енергонавантажених конструкцій в ядерно-енергетичних і радіаційних технологіях.

4. Запропоновано новий підхід до моделювання кірально чистого середовища у високомолекулярних сполуках біологічної природи, що розширює межі застосування феноменологічної теорії фазових переходів. Запропонована автором модель здатна слугувати додатковим інструментом для визначення чинника переваги у вигляді природного підвищеного радіаційного фону в процесі еволюції рацемічного біологічного середовища.

5. Повнота викладення основних результатів дисертації в опублікованих працях.

Дисертація має класичну, логічно вибудовану структуру (Вступ, 5 розділів, Висновки) обсягом 176 сторінок, містить багатий ілюстративний матеріал (66 рисунків) та солідне бібліографічне підґрунтя (181 джерело). Основні результати повністю відображені у 5 статтях у провідних фахових виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus (квартиль Q3), та апробовані на 5 міжнародних та всеукраїнських конференціях, що повністю задовольняє вимогам МОН України.

6. Відповідність вимогам академічної доброчесності.

Наведені в дисертації результати є новими, робота не містить запозичених даних інших авторів без належних посилань на їхні дослідження, тобто робота відповідає умовам академічної доброчесності.

7. Зауваження до тексту дисертації:

1. У тексті дисертації при побудові термодинамічного потенціалу враховуються внески від вищих градієнтів параметра порядку. Було б доцільно ширше обґрунтувати фізичні критерії, за яких обмеження саме цим порядком градієнтних доданків у функціоналі вільної енергії є абсолютно достатнім для опису критичної поведінки в околиці точок Ліфшиця.

2. Автор оригінально описує трансформацію просторового розподілу структурних неоднорідностей на прикладі молібдену під дією інтенсивного зовнішнього впливу. Проте наведені у роботі експериментальні дослідження (рентгеноструктурний аналіз, електронна мікроскопія тощо) мають скоріше якісний, оглядовий характер стосовно запропонованого теоретичного опису. Було б доцільно детальніше обговорити межі узгодження розробленого математичного апарату безпосередньо з кількісними параметрами отриманих експериментальних мікроструктур.

3. Результати дослідження динаміки електричного заряду в полімерах мають очевидну практичну цінність для електростатичної сепарації відходів. Було б корисно побачити у роботі конкретні кількісні рекомендації (наприклад, оптимальні діапазони напруженості поля чи температурні режими), які необхідні інженерам для безпосереднього проєктування промислових сепараторів.

4. У тексті дисертації зустрічаються окремі стилістичні неточності, технічні описки у складних математичних виразах, а також повтори формулювань (зокрема, у Вступі на с. 16 двічі поспіль дублюється теза про приклади просторового впорядкування у твердих тілах).

Наведені зауваження, однак, не мають принципового характеру і не знижують загальну високу наукову цінність роботи.

8. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Шимановського Андрія Романовича «Симетрія, консолідація, модульовані структури параметру порядку» є завершеною

самостійною науковою працею, яка містить нові, науково обґрунтовані результати, що вирішують важливу наукову задачу сучасної прикладної фізики — встановлення закономірностей критичної поведінки та просторової еволюції конденсованих середовищ у критичних областях та під дією зовнішніх чинників.

Дисертація відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (редакція від 01.01.2024 р.), а також вимогам наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. №40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки №759 від 31.05.2019 р.).

Враховуючи актуальність, обґрунтованість наукових положень висновків, наукову новизну та практичну значущість дисертаційної роботи, вважаю, що Шимановський Андрій Романович заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Офіційний опонент:

Професор кафедри прикладної математики

та моделювання складних систем

Сумського державного

університету МОН України,

доктор фізико-математичних наук, професор

Олексій ХОМЕНКО

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 12:38:02 23.07.2026

Назва файлу з підписом: Відгук Хоменко.pdf.asice
Розмір файлу з підписом: 119.4 КБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: Відгук Хоменко.pdf
Розмір файлу без підпису: 122.1 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ХОМЕНКО ОЛЕКСІЙ ВІТАЛІЙОВИЧ
П.І.Б.: ХОМЕНКО ОЛЕКСІЙ ВІТАЛІЙОВИЧ
Країна: Україна
РНОКПП: 2604912396
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 12:38:01 23.07.2026
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000B87E20012DE57E07
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145
Тип підпису: Удосконалений
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)
Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2026.07.08 13:00

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна
професору Сергію ЛИТОВЧЕНКО
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Шимановського Андрія Романовича «Симетрія, консолідація, модульовані структури параметру порядку», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Серед сучасних напрямків фізики теорія критичних явищ є однією з тих, що найбільш інтенсивно розвиваються. Критичні явища здатні виникати в фізичних системах різної природи і різного агрегатного та елементного складу. Однак особливістю цієї теорії є саме її застосовність до різних галузей фізики (фізики елементарних частинок, фізики конденсованого стану), суміжних наук (хімії, біології) та явищ на стику цих дисциплін.

Основною характерною рисою математичних моделей, що виникають при описі критичних явищ, є нелінійність. Для нелінійних задач не існує загальних аналітичних розв'язків, тому важливо вміти якщо не знаходити точні рішення, то принаймні передбачати їхню поведінку в окремих випадках. Одним із найпотужніших методів дослідження таких задач є симетрійний аналіз. Із його допомогою в цій роботі досліджуються критичні явища, що виникають під час фазових переходів.

Рівноважні просторово-неоднорідні модульовані структури, що характеризуються однокомпонентним параметром порядку, відіграють важливу роль у фізиці твердого тіла. Моделі таких структур використовуються для дослідження фазових переходів у багатьох поляризованих системах

(сегнетоелектриках, магнетиках, діелектриках), а також у сплавах. Завдяки відносній наочності експериментального спостереження поляризованих середовищ з'являється можливість сформулювати та апробувати найважливіші положення теорії модульованих структур. Отримані результати мають універсальний характер і можуть застосовуватися як до основних, так і до збуджених неоднорідних станів у різних фізичних системах. Серед найвідоміших фізичних ефектів, які описуються в межах цього підходу, є переходи систем у стан надпровідності та надплинності, а також переходи в магнітний і парамагнітний стани. Усі вони, своєю чергою, лежать в основі проривних інноваційних рішень. Отже, тема роботи є актуальною.

У дисертаційній роботі вперше отримано та обґрунтовано низку нових наукових результатів, зокрема:

- встановлено, що спонтанне порушення парності для скалярних параметрів порядку як функцій координат призводить до виникнення в упорядкованих середовищах низки модульованих фаз, що різняться своєю просторовою симетрією. Зокрема, ідентифіковано існування неперіодичної виродженої солітонної фази;

- побудовано нові класи точних просторових розподілів параметра порядку відповідної моделі; сформульовано критерії та умови інтегрованості нелінійних варіаційних рівнянь у моделях, що враховують внески вищих градієнтів і нелінійностей параметра порядку;

- описано трансформацію просторового розподілу структурних неоднорідностей, зумовлених ефектом Бенара-Марангоні, на прикладі молибдену за умов інтенсивного зовнішнього впливу;

- запропоновано новий підхід до обчислення параметра порядку в моделі формування кірально чистого середовища, що виникає внаслідок спонтанного порушення симетрії у високомолекулярних сполуках живої природи.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування отриманих результатів для опису структурно-фазових перетворень у реальних матеріалах, зокрема в металах і сплавах за умов інтенсивних зовнішніх впливів.

Крім того, результати дисертації можуть бути використані в навчальному процесі під час викладання курсів із фізики твердого тіла, теорії фазових переходів та прикладної фізики.

Матеріал дисертаційної роботи викладено логічно та послідовно, у доступній для сприйняття формі. Стиль викладу відповідає вимогам наукових досліджень, у роботі використано сучасну загальноприйняту наукову термінологію.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаних джерел.

Перший розділ є оглядовим, в якому здійснено аналіз як сучасних публікацій, що охоплюються періодом 2020-2025 рр, так і більш ранніми роботами. Зосереджуючись на аналізі процесів, що відбуваються в матеріалах із модульованими станами, автор відзначає їх надзвичайну перспективність для створення енергонезалежної пам'яті нового покоління, для якої властиве як низьке енергоспоживання, так і висока швидкість запису. Іншими напрямками застосувань пристрої надшвидкої комутації, високочутливих детекторів магнітного поля, електрокалорійних систем охолодження для мікропроцесорів та радарів із фазованими антенними решітками. Відзначається, що важливою перевагою матеріалів з модульованими станами є їхня підвищена резистентність до жорсткого радіаційного випромінювання. Це робить їх незамінними для роботи в екстремальних умовах космосу або ядерної енергетики. Значна частина огляду присвячена аналізу підходів для опису таких систем, що ґрунтуються на феноменологічній теорії Ландау фазових переходів, яка широко використовується при теоретичному описі параметричної еволюції несумірних станів. В основі такого підходу лежить аналіз нерівноважного термодинамічного потенціалу системи, який у загальному випадку є функціоналом просторово неоднорідного параметра порядку. Наведено обґрунтування того, що класична феноменологічна схема потребує розширення шляхом врахування некласичних температурних залежностей коефіцієнтів та інваріантів високих порядків. Обґрунтована важливість розуміння

термодинамічних процесів, що супроводжуються утворенням впорядкованих модульованих структур в тугоплавких матеріалах під впливом радіаційно-термічних чинників.

Другий розділ є традиційно методичним, де описані методи дослідження мікроструктури, фазового складу та механічних властивостей. Описана фізична розрахункова модель на основі параболічного рівняння теплопровідності для визначення температурного поля, де як джерело тепла виступила функція розподілу поглиненої дози випромінювання.

В третьому розділі розроблено підхід, який ґрунтується на використанні інваріантів, що містять вищі похідні параметра порядку. Саме завдяки врахуванню таких інваріантів можливо коректно описувати появу нелінійних розподілів параметра порядку у системі. З'ясовано механізми нелінійної еволюції модульованих структур та появи модульованих станів, що зумовлені конкуренцією та компромісом різних за своїм характером взаємодій. Знайдено вираз для інваріанту, який є відповідальним за появу нелінійних особливостей поведінки просторового розподілу параметра порядку, зокрема кінкових розподілів. За своїм мікроскопічним походженням такий інваріант може бути пов'язаним з тією частиною мікроскопічного гамільтоніану системи, яка характеризує нелінійну взаємодію поля параметра порядку і описується за допомогою доданка енергії вищих порядків. Встановлено умови, за яких виникають розв'язки, що відповідають виникненню більш ніж двох локалізованих областей на фазовій діаграмі. Ці ситуації відповідають випадкам, коли при еволюції таких систем можуть виникати стани, які відрізняються не тільки знаком параметра порядку, але і його величиною. Здійснена спроба поширити здобуті результати на прогнозування процесів нелінійної релаксації електричного заряду в полярних та неполярних діелектриках, що були попередньо опромінені електронним пучком.

В четвертому розділі на підставі аналізу попередньо знайдених рішень показано, що деякі з них дозволяють коректно описати відому з експериментальних робіт параметричну еволюцію модульованих структур

скалярного параметра порядку. Проведено детальне дослідження розв'язків, параметрична еволюція яких веде до появи кінкових розподілів, зокрема, розподіли параметра порядку, які описуються через еліптичні функції. Здійснено аналіз особливостей знайдених розподілів параметра порядку і дана оцінка їх придатності для моделювання різних станів в сегнетоелектриках і магнетиках з однокомпонентним параметром порядку. Досліджено властивості просторових розподілів параметра порядку, що виражаються через еліптичні функції Якобі. На прикладах одержаних графічних залежностей показано, що точні еліптичні розв'язки не реалізують абсолютний мінімум термодинамічного потенціалу системи і не можуть бути використані для опису рівноважних розподілів скалярного параметра порядку. Знайдено, що при деяких значеннях параметрів потенціалу існують точні розв'язки, енергія яких проходить через нуль поблизу точки фазового переходу в сумірну фазу.

П'ятий розділ привертає увагу тим, що має експериментальний характер, і для дослідження фазових переходів у ньому використано такий інструмент, як сильнострумний релятивістський пучок електронів. Це перегукується з відомою роботою В. Сльозова, на яку є посилання в дисертації, де було запропоновано методами радіаційної акустики досліджувати динаміку фазових переходів у матеріалах із нелінійними термопружними характеристиками. У цій роботі інструментом генерації акустичних хвиль у мішені також слугував імпульсний електронний пучок. Дисертант обрав дещо простіший матеріал — молібден, для якого термопружні характеристики не демонструють вираженої нелінійності, на відміну, наприклад, від гадолінію. Для гадолінію температура Кюрі становить 292 К, і під час опромінення в ньому відбувається фазовий перехід другого роду (перехід із феромагнітного в парамагнітний стан). Крім того, змінює знак параметр Грюнайзена, що зумовлює появу додаткового механізму формування акустичного імпульсу.

Серед результатів, отриманих у цьому розділі, слід відзначити дослідження особливостей зеренної структури поверхневого шару мішені, модифікованого пучком. Це явище є важливим для оцінювання теплофізичних

характеристик матеріалу під час експлуатації в умовах радіаційно-термічних навантажень. Поряд з експериментальними дослідженнями проводилося також комп'ютерне моделювання розподілу дози випромінювання, що загалом сприяло більш об'єктивному аналізу та інтерпретації спостережуваних явищ.

Аналіз дисертаційної роботи та наукових публікацій за її темою не виявив порушень принципів академічної доброчесності. Дисертація є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Має належні посилання на відповідні джерела інформації.

Обґрунтованість і достовірність отриманих наукових результатів забезпечуються використанням фундаментальних теоретичних підходів, сучасних методів дослідження, а також ретельним зіставленням отриманих результатів із даними наукової літератури.

Результати дисертаційного дослідження опубліковано в достатній кількості в провідних фахових виданнях, які індексуються в Scopus, та пройшли апробацію на профільних конференціях і наукових семінарах.

До дисертаційної роботи можна зробити такі зауваження:

1. У роботі зазначається, що при імпульсному електронно-пучковому переппаві молібденової мішені мав місце значний температурний градієнт, що зумовлював просторовий рух фронту кристалізації. У зв'язку з цим доцільним було б дослідити розподіл концентрації домішок у напрямку від осі відбитка пучка до периферії. Водночас у роботі наведено результати визначення елементного складу без уточнення, в яких саме ділянках мішені проводилися відповідні вимірювання.

2. У тексті спостерігаються окремі мовні неточності. Так, уже на стор. 2 вжито вислів «на околиці точок фазових переходів», тоді як коректніше — «в околі точок фазових переходів». Подібні неточності мають поодинокий характер, однак повторюються в тексті.

3. Оскільки в роботі розглядаються радіаційно-акустичні ефекти під дією електронного пучка, слід зауважити, що під час аналізу механізмів виникнення

дисипативних структур на поверхні мішені враховано переважно конкуренцію сил масопереносу, зумовлених температурним градієнтом, і сил поверхневого натягу. Водночас акустичні ефекти, зумовлені дією електронного пучка, не враховувались.

Разом із тим зазначені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Дисертація повністю відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (редакція від 01.01.2024 р.), а також вимогам наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. №40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки №759 від 31.05.2019 р.) а її автор Шимановський Андрій Романович заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Офіційний опонент:

Завідувач відділу чистих металів,
металофізики і технології нових
матеріалів ННЦ «Харківський
фізико-технічний інститут»
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

Микола ПИЛИПЕНКО

ПИЛИПЕНКО МИКОЛА МИКОЛАЙОВИЧ

Результат перевірки підпису	Підпис вірний
П.І.Б.	ПИЛИПЕНКО МИКОЛА МИКОЛАЙОВИЧ
РНОКПП	2095801070
Організація (установа)	ФІЗИЧНА ОСОБА
Код ЄДРПОУ	
Посада	
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для даних від Надавача)	16:04:07 20.07.2026
Сертифікат виданий	КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер	5E984D526F82F38F0400000036BCAE0177DAA107
Тип носія особистого ключа	Захищений
Алгоритм підпису	dstu4145
Тип підпису	Кваліфікований
Формат підпису	CAdES-T
Сертифікат	Кваліфікований

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна
професору Сергію ЛИТОВЧЕНКО
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

РЕЦЕНЗІЯ

старшого наукового співробітника науково-дослідної частини
ННІ «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна кандидата фізико-математичних наук Гречка Ярослава
Олеговича на дисертаційну роботу Шимановського Андрія Романовича
«Симетрія, консолідація, модульовані структури параметру порядку», подану
на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за
спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

Застосування термодинамічних потенціалів для опису переходу
речовини від одного агрегатного стану (тверде тіло-рідина, рідина-пара та
зворотні процеси) в інший поклало початок цілісного бачення
закономірностей перебігу таких процесів та можливості розрахунку
термодинамічних величин (температури, тиску) за яких ці переходи
відбуваються. Основною ознакою таких переходів є перші похідні від
термодинамічних потенціалів для яких є властивим стрибкоподібна зміна
значень при переході речовини в інший агрегатний стан, що одержало назву
фазових переходів першого роду. Іншим явищем є фазові переходи другого
роду, які в певній мірі є спорідненими до переходів першого роду завдяки
спонтанності процесу, тригер до якого вмикається в момент досягнення
критичного значення певним термодинамічним параметром, наприклад,
температури. Відмінністю ж його є те, що перші похідні від термодинамічних

потенціалів при цьому змінюються плавно і лише похідні другого порядку змінюються стрибкоподібно. При цьому агрегатний стан речовини не змінюється, але змінюється її внутрішня структура, наприклад, виникає спонтанна магнітна поляризація, перехід в надпровідний стан, перехід в надплинний стан. Нелінійність відгуку конденсованих середовищ на зміну зовнішніх термодинамічних параметрів зумовило розвиток теорії фазових переходів. Отже пошук нових розв'язків виразу для термодинамічного потенціалу становить інтерес для розвитку фундаментальних основ фізики конденсованого стану, адже залишається проблема неузгодженості з іншими термодинамічними підходами, наприклад моделлю Ізінга. Одним з неопрацьованих напрямків був пошук розв'язків для моделі, що містить члени вищих ступенів, зокрема, шостого порядку. Отже тема роботи є безумовно актуальною.

Вступ до дисертаційної роботи містить всі необхідні складові, що стисло характеризують наукову новизну, практичне значення, достовірність, публікації та ін.

В першому розділі наведений аналіз конденсованих систем пов'язаний з вивченням модульованих структур параметра порядку і фазових переходів з утворенням таких структур. При цьому важливий інтерес викликають несумірні фази, які виникають при різноманітних структурних переходах, гелікоїдальні фази в магнетиках і рідких кристалах, просторово-періодичні стани в емульсіях та органічних середовищах. Обґрунтовується, що нові результати про теплоємність і діелектричну сприйнятливість сегнетоелектриків та магнітну сприйнятливність магнетиків, можуть бути одержані шляхом розробки нових універсальних методів пошуку точних та модельних розподілів параметрів порядку, які можна представити за допомогою еліптичних функцій. До важливих кінцевих результатів роботи слід віднести також розробку моделей, які коректно відображатимуть основні стани параметрів порядку, що описуються варіаційним рівнянням для термодинамічного потенціалу типу Гінзбурга-Ландау з вищими похідними

параметра порядку та його вищими степенями. Обґрунтовано, що відбивні властивості та механічні характеристики тугоплавких матеріалів, зокрема, молібдену після імпульсного переплаву внаслідок дії концентрованого потоку енергії залежатимуть від виникнення умов, що створюють дисипативні структури.

В другому розділі наведені проміжні викладки, що використовувались, одержані при застосуванні чисельної моделі для розрахунку просторово-часових залежностей температури в опромінюваних зразках, зокрема, залежності теплофізичних характеристик матеріалу від температури. Також стисло описані експериментальні методи, що застосовувались для вимірювання мікротвердості, проведення рентгеноструктурного аналізу тощо.

Третій розділ спрямований на розробку нових методів із застосуванням варіаційних рівнянь для опису модульованих станів конденсованих систем, розвиток мікроскопічної теорії просторово-періодичних станів і знаходження розв'язків рівнянь газової динаміки, інваріантних відносно підгруп повної групи симетрії цих рівнянь. Перевага такого підходу полягає в можливості кількісного опису властивостей системи за допомогою обмеженого набору макроскопічних величин. Ці параметри можна отримати як шляхом прямих експериментів, так і через оцінки в межах мікроскопічних моделей. Дисертантові вдалось розкрити фундаментальні фізичні механізми досліджуваних явищ, уникаючи надмірної деталізації розрахунків або обчислювальних обмежень, що часто притаманні комп'ютерному моделюванню під час використання мікроскопічних підходів.

Варто відзначити, що результатом також є те, що дисертант застосував принцип спонтанного порушення симетрії до спроби пояснення кіральної чистоти в молекулах нуклеїнових кислот та ферментах живої природи. Для пояснення того, що в будові перших присутні виключно D-ізомери цукри, а в других виключно L-ізомери амінокислоти, пропонувалось велика кількість моделей, які мали б описувати можливі еволюційні сценарії виникнення та збереження такого термодинамічного нерівноважного стану. В основі всіх

моделей застосовується параметр порядку, що характеризує динаміку співвідношення кількості правих та лівих ізомерів. Використання вказаного параметра порядку при розв'язанні у варіаційного рівняння термодинамічного потенціалу Ландау здатне показати можливості досягнення динаміки процесу, сумірної з часовим масштабом еволюції добіогенного сценарію утворення живої природи на Землі. Дисертант застосував вищі похідні для з'ясування факторів переваги в формуванні кіральної чистоти та запропонував модель вторинного випромінювання як підсилюючого чинника фактору переваги, яким виступав природній радіаційний фон.

У четвертому розділі розглянуті дослідження порушення симетрії, як явища, що супроводжує фазові переходи, з огляду на ефекти розмиття фазових границь, появи метастабільних фаз або зниження температур фазових переходів в матеріалах, які містять домішки. В той же час є відомим, що певні типи фазових переходів вдається реєструвати саме у високочистих матеріалах. Як приклад цього наводиться опис парамагнітно-діамагнітний переходу у високочистому металічному ітербію, що не властиво для ітербію з домішками. Дослідження фазових переходів здійснюється шляхом аналізу сумірно-неумірних фаз, де відбувається змінна фази або відбувається модуляція амплітуди. Для їх опису застосовано апарат функцій Якобі. Слід зазначити, що функції Якобі в теорії нелінійних процесів відіграють таку саму роль, як гармонічні функції в теорії лінійних процесів. Дисертантом одержана сукупність графічних залежностей, які доводять, що варіація констант в розв'язках для термодинамічного потенціалу дозволяє ефективно керувати амплітудним профілем розв'язків, так і напрямком їхньої температурної еволюції.

У п'ятому розділі проведено комплексне дослідження впливу сильнотривового релятивістського електронного пучка на молібденову мішень. Опромінення здійснювалось за енергетичних параметрів при яких відбувався імпульсний переплав поверхневих шарів мішені з наступною кристалізацією. Встановлено, що внаслідок опромінення мікротвердість

модифікованого опроміненням прошарку молібдену збільшилась на 7% у порівнянні з початковим станом. Робиться припущення, що оскільки досліджується чистий молібден, а до того ж в переплавленому прошарку не утворюється дрібнодисперсна зеренна структура, то підвищення мікротвердості може бути зумовлене лише дислокаційним механізмом. Основним результатом розділу є експериментально спостережене утворення модульованого в просторі хвилеподібного рельєфу поверхні за умов досягнення певних значень конкуруючими фізичним полями, а саме температурного градієнту та сили поверхневого натягу. Здобутий результат має практичне значення, оскільки він має враховуватись при аналогічних енергетичних впливах на тугоплавкі матеріали, наприклад при струмовому зриві в термоядерному реакторі.

Результати роботи опубліковані в п'яти статтях, у фахових журналах, що індексуються Scopus і належать до квартилю Q3, тобто умовний еквівалент кількості статей є переконливо достатнім. Також результати пройшли належну апробацію.

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

Дисертаційна робота не позбавлена недоліків, серед яких можна відзначити такі:

1. По тексту спостерігається стилістична непослідовність. Так на стор. 16 вживається слово «чинник» і вже в наступному реченні аналізуються «фактори».
2. В роботі трапляються вади у вжитті термінології, зокрема на стор. 24. вживається термін «в околиці критичної температури», тоді як вірно «в околі критичної температури».

3. При проведенні дослідження опроміненої мішені з молібдену слід було дати оцінку можливості одержання аморфоподібного стану, адже швидкості зміни температури є достатньо високими, тобто 10^6 - 10^8 К/сек.

В цілому ці недоліки не впливають на позитивне враження від роботи.

Як підсумок зазначаю, що дисертаційна робота А.Р. Шимановського «Симетрія, консолідація, модульовані структури параметра порядку» є цілісною завершеною науковою працею, що повністю **відповідає вимогам** пп. 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами від 21 березня 2022 р. № 341, від 19.05.2023 № 502 і від 03.05.2024 № 507. За своєю спрямованістю та змістом дисертаційна робота відповідає спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали, галузі знань 10 – Природничі науки. Дисертація містить обґрунтовані висновки на основі одержаних здобувачем достовірних результатів, характеризується єдністю змісту та відповідає принципам академічної доброчесності, а її автор, **Шимановський Андрій Романович**, заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Офіційний рецензент:

Старший науковий співробітник
науково-дослідної частини
ННІ «Фізико-технічний факультет»
Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна
кандидат фізико-математичних наук

Ярослав ГРЕЧКО

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 11:19:52 24.07.2026

Назва файлу з підписом: Гречко_Рецензія Шимановський.pdf.asice
Розмір файлу з підписом: 90.3 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Гречко_Рецензія Шимановський.pdf
Розмір файлу без підпису: 87.5 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ГРЕЧКО ЯРОСЛАВ ОЛЕГОВИЧ

П.І.Б.: ГРЕЧКО ЯРОСЛАВ ОЛЕГОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 3340606476

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 11:19:51 24.07.2026

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F040000007C842201BB7FB806

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)

Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2026.07.08 13:00

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна
професору Сергію ЛИТОВЧЕНКО
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

РЕЦЕНЗІЯ

старшого наукового співробітника науково-дослідної частини
ННІ «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна кандидата фізико-математичних наук Максакової Ольги
Василівни на дисертаційну роботу Шимановського Андрія Романовича
«Симетрія, консолідація, модульовані структури параметру порядку»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань
10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та
наноматеріали.

Актуальність роботи. Розвиток сучасних технічних систем на основі
інноваційних матеріалів, таких як сегнетоелектрики, магнетики, бінарні
сплави та інші, передбачає створення узагальнюючих фізичних моделей, що
описують їх поведінку. Складність цієї задачі полягає в тому, що технологічно
перспективні ефекти в згаданих матеріалах характеризуються спонтанним
порушенням симетрії з появою модульованих структур скалярного параметра
порядку. Це проявляється у виникненні ефективних далекодіючих взаємодій,
які й забезпечують існування рівноважних просторово-неоднорідних станів
параметра порядку (поляризації, магнітного моменту, вектора
антиферромагнетизму, концентрації та ін.). Для формалізованого узагальнення
таких процесів та побудови їх фізичних моделей Ландау запропонував підхід,

який ґрунтується на твердженні, що при фазовому переході другого роду, зумовленому зміною термодинамічних параметрів, симетрія системи також стрибкоподібно знижується, тобто речовина перестає бути ізотропно розподіленою в просторі, а виникають певні ознаки впорядкованості, що вже не дозволяє здійснювати довільні трансляції в просторі. Для характеристики ступеня зміни симетрії було застосовано узагальнену величину, яка одержала назву параметра порядку. Для розвитку цього підходу була запропонована математична модель, що описувала термодинамічний потенціал системи як нескінченний ступеневий поліном від параметра порядку, який фізично означав певну залежність від температури та тиску, а при доданках стояли коефіцієнти, що також мали фізичний зміст. Для адаптації математичної моделі до тих або інших реальних фізичних умов пропонувалося обмежитися доданками не вище четвертого ступеня. Як приклад різноманітності та непередбачуваності її розв'язків можна навести відкриття О. Абрикосовим надпровідності другого типу, що ґрунтується на проникненні електромагнітного поля в провідник і яка була передбачена на основі розв'язання моделі Гінзбурга-Ландау. Разом з тим залишаються нерозвиненими можливості розгляду доданків із вищими ступенями, що може бути перспективним для розв'язання низки задач, наприклад, еволюції органічних систем під дією опромінення. Також важливим є встановлення нових ефектів просторового порушення симетрії в системах під дією потоків іонізуючого випромінювання. Це дає підстави вважати тему роботи актуальною.

Публікація результатів. Результати роботи досить повно відображені в 5 статтях, опублікованих у фахових виданнях, індексованих наукометричною базою Scopus (Q3). Також результати доповідалися на фахових конференціях. У коментарях до всіх робіт обґрунтовано, що внесок дисертанта дозволяє сформулювати основні положення даної дисертаційної роботи.

У вступній частині висвітлено актуальність роботи, практичні напрямки застосування результатів, у тому числі, в галузі створення та використання наноматеріалів.

У першому розділі наведено опис об'єктів та систем, здатних формувати просторово неоднорідні стани з довгоперіодичними структурами розподілу фізичних характеристик, до яких належать розподіли спонтанної поляризації в сегнетоелектриках або намагніченості у феромагнетиках, що виникають під час структурних фазових переходів у об'ємних кристалах, тонких плівках та складних наноструктурах. Зазначається, що до цього класу явищ належать хвилі зарядової щільності в металах, гелікоїдальне впорядкування у магнетиках, а також специфічні модуляції складу в багатокомпонентних сплавах. Проаналізовано особливості застосування концепції точки Ліфшиця для опису потрібної точки на фазовій діаграмі, що розділяє області прямого переходу з неупорядкованої фази в сумірну. Обґрунтовано важливість розуміння особливостей фазових переходів в молібдені як матеріалі, що експлуатується в умовах екстремальних радіаційно-термічних впливів.

У другому розділі описано методики проведення робіт з експериментальними зразками та наведено опис принципів побудови розрахункової моделі, що описує динаміку температурного поля в опроміненій мішені.

Третій розділ присвячено підходам до феноменологічного опису систем із модульованими структурами однокомпонентного параметра порядку, зокрема, аналізу фазових переходів другого роду, який базується на положеннях теорії Ландау. Ключовою концепцією якої є припущення про те, що будь-який стан системи описується єдиною за своєю аналітичною формою термодинамічною функцією. Реалізація цього завдання передбачає побудову та аналіз нерівноважного термодинамічного потенціалу системи, який, в загальному випадку, розглядається як функціонал від параметра порядку, що, в свою чергу, залежить від просторової координати. Зазвичай залежність термодинамічного потенціалу подається у вигляді степеневого ряду, де

враховуються кілька перших членів з нижчими ступенями. Конкретний склад і властивості доданків у цьому виразі визначаються симетрією досліджуваної фізичної системи. Використовуючи рівняння для еліптичних функцій Якобі, проаналізовано принципово можливі стани системи, що виникають під час фазових переходів із високосиметричної фази в низькосиметричну.

У четвертому розділі детально розглянуто часткові розв'язки варіаційного рівняння для систем із несумірними станами. Ці розв'язки виражаються через функції Якобі: еліптичні синус, косинус та дельта-амплітуди. При цьому отримано, що ці розв'язки можуть мати фізичний сенс тільки при певних, досить специфічних значеннях параметрів середовища.

Показано, що при зміні квадрату параметра ступені нелінійності від 0 до 1 відбувається якісна трансформація системи. При цьому плавна гармонічна хвиля поступово деформується, утворюючи дві області, в одній параметр порядку, наближаючись близький до сумірного значення, розширюються, а переходи між ними звужуються. У граничному випадку, коли значення квадрата ступені нелінійності наближається до одиниці, структура перетворюється на решітку доменних стінок (солітонів), що розділяють області однорідного впорядкування. Вибір еліптичного косинуса та дельта-амплітуди, обумовлений тим, що сценарій фазових переходів, відповідає експериментально спостережуваній послідовності фазових переходів у фізичних системах. Таким чином, модель на основі функцій еліптичного косинуса та дельта-амплітуди дає змогу наочно описати процес виникнення солітонів у модульованій фазі. Практичне значення цього підходу полягає в тому, що його можна застосовувати при описі рівноважних станів у таких системах з однокомпонентним параметром порядку, як одновісні сегнетоелектрики та магнетики.

П'ятий розділ роботи є переважно експериментальним, разом з тим предмет дослідження, а саме, молібденові мішені, опромінені сильнострумовим релятивістським електронним пучком, розглядаються як приклад відкритих систем, в яких при певній інтенсивності опромінення

можуть виникати дисипативні структури у вигляді гідродинамічних нестійкостей типу Бенара-Марангоні, що є проявом порушення симетрії. Таким чином, дотримується загальна дослідницька концепція, відображена в назві роботи. У розділі здобуто цікаві результати з точки зору модифікації структури поверхні опроміненої пластини, вона дорівнює близько 30 мкм, що є технологічно перспективним ефектом. При цьому утворюється стовпчаста зеренна структура. Це є також проявом механізму консолідації розплавленої речовини, яка проявилася у вигляді епітаксiального механізму конденсації. Найбільш виразним результатом є експериментально зафіксоване утворення хвилеподібного рельєфу на певній відстані від осі пучка, тобто досягнення критичного співвідношення між конкурентними силами поверхневого натягу розплавленого пучком шару та значенням градієнту температури вздовж поверхні. Автором на основі авторського програмного забезпечення побудовано чисельно-розрахункову модель та одержано значення динаміки розподілу температурного поля в опромінюваній мішені, на підставі чого можна визначити умови виникнення гідродинамічних нестійкостей.

Здобуті результати узагальнені в *розділі Висновки*.

Зауваження до тексту дисертації:

1. Слід було навести дані про особливості мікроструктури молибденової мішені не тільки в поперечному перерізі, а й по площині залежно від інтенсивності електронного пучка.

2. Посилаючись на авторське програмне забезпечення, що використовувалося для розрахунків, було б доречно навести лістинг в додатку до дисертації, адже це відповідало б принципам відкритої науки.

3. При розрахунковому аналізі динаміки фазового переходу в молибдені під впливом сильнострумового пучка електронів враховується залежність теплофізичних характеристик та густини від температури, при цьому ця залежність має свій мінімум, але автор не вказує, чи відповідає ця точка мінімуму можливо якогось фазового переходу.

Дані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Відповідність вимогам академічної доброчесності.

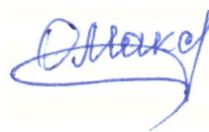
Наведені в дисертації результати є новими, робота не містить запозичених даних інших авторів без належних посилань на їхні дослідження, тобто робота відповідає умовам академічної доброчесності.

Загальні висновки щодо дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота «Симетрія, консолідація, модульовані структури параметра порядку», є оригінальною завершеною науковою працею, що повністю відповідає вимогам пп.7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами від 21 березня 2022 р. № 341, від 19.05.2023 № 502 і від 03.05.2024 № 507. Зміст дисертаційної робота відповідає спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали, галузі знань 10 – Природничі науки. Дисертація містить обґрунтовані висновки на основі одержаних здобувачем достовірних результатів, характеризується єдністю змісту та відповідає принципам академічної доброчесності, а її автор, Шимановський Андрій Романович, заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Офіційний рецензент:

Старший науковий співробітник
науково-дослідної частини
ННІ «Фізико-технічний факультет»
Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна
кандидат фізико-математичних наук



Ольга МАКСАКОВА

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 16:26:06 27.07.2026

Назва файлу з підписом: Рецензія Шимановський Максакова.pdf.p7s
Розмір файлу з підписом: 233.0 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Рецензія Шимановський Максакова.pdf
Розмір файлу без підпису: 215.7 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: МАКСАКОВА ОЛЬГА ВАСИЛІВНА

П.І.Б.: МАКСАКОВА ОЛЬГА ВАСИЛІВНА

Країна: Україна

РНОКПП: 3226411125

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 16:26:05 27.07.2026

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F040000002734BA016209B007

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в одному файлі (CAdES enveloped)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAdES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2026.07.08 13:00