

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Коппа Михайла Йосиповича

«Генерація нелінійних структур в гідродинамічних середовищах під впливом зовнішніх полів»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю

01.04.02 – «теоретична фізика»

Дисертаційна робота М. Й. Коппа виконана у знаній науковій школі д.ф.-м.н., проф. В. В. Яновського з вивчення та дослідження нелінійних процесів у сильно нерівноважних системах. Подана дисертація спрямована на розвинення та систематизацію лінійних та нелінійних теорій опису явищ самоорганізації з виникненням просторово-часових дисипативних структур із відповідним теоретичним аналізом процесів генерації нелінійних структур у гідродинамічних середовищах, що зазнають впливу зовнішніх полів. У роботі розроблено теоретичні моделі формування та еволюції складних нелінійних утворень у гідродинамічних системах різної фізичної природи та просторово-часового масштабу. Важливим у проведенні відповідних досліджень є те, що отримані під час їх виконання результати дозволяють не лише поглибити розуміння фундаментальних принципів нелінійної динаміки та ефектів самоорганізації у гідродинамічних середовищах, а й з'ясувати характер впливу зовнішніх полів на відповідні процеси, що є однією з найактуальніших проблем сучасної теоретичної фізики, фізики конденсованого стану, фізики плазми та фізики нанооб'єктів. Явища самоорганізації та структуроутворення в таких середовищах виникають у багатьох фізичних процесах, включаючи лабораторні експерименти з магнітогідродинамічними течіями, а також проявляються в астрофізичних і геофізичних умовах. Особливу наукову зацікавленість викликають системи з обертанням, у яких зовнішні поля, зокрема магнітні та гравітаційні, суттєво змінюють гідродинамічну поведінку й спричиняють формування нетривіальних просторово-часових структур. Для багатьох із цих процесів, що мають як фундаментальне, так і прикладне значення в контексті проблем плазмової фізики, астрофізики та геофізики, відповідне теоретичне та числове моделювання лишається вельми актуальним і потребує постійного розвинення з урахуванням складної взаємодії між елементами нелінійних систем та способу зовнішнього керування їх поведінкою з прогнозованою структурою відгуку. У роботі вивчено вплив зовнішніх магнітних, гравітаційних полів та температурних градієнтів на характер виникнення нелінійних структур у гідродинамічних середовищах із аналізом їх стійкості та реалізацією регулярних та нерегулярних патернів у їх поведінці за впливу зовнішніх факторів. Це визначає **актуальність** поданої дисертаційної роботи, яка підтверджується тим, що проведені дисертантом дослідження є складовою частиною низки науково-дослідних робіт і проєктів, які виконувались в Інституті монокристалів Національної академії наук України з 2016 по 2024 роки. **Новизна роботи**, з одного боку, полягає у встановленні механізмів формування нових класів нелінійних структур у гідродинамічних середовищах різних природи та масштабу за наявності комплексного зовнішнього впливу з розробленням строго теоретичного підходу до опису структурування в турбулентних середовищах. З іншого боку, новизна пов'язується з вирішенням відомої наукової проблеми теплової конвекції з урахуванням впливу неоднорідного обертання середовища за наявності магнітного поля спірального типу, яка лишається відкритою понад кілька десятиріч.

Зміст і структура дисертаційної роботи повністю відповідають вимогам до докторських дисертацій: робота містить 462 сторінки друкованого тексту, складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 290 найменувань і одного додатка. У **вступі** обґрунтовано актуальність проведених досліджень, сформульовано мету роботи, основні завдання та методи досліджень, наведено основні результати роботи із зазначенням їх новизни та науково-практичного значення, подано інформацію про апробацію результатів дисертаційної роботи та особистий внесок здобувача.

Перший розділ дисертації присвячено теоретичному дослідженню процесів генерації та еволюції великомасштабних вихрових структур у середовищах, що обертаються, під дією зовнішньої дрібномасштабної сили. Використано багатомасштабний асимптотичний підхід, що дозволяє описати динаміку збурень на різних просторово-часових масштабах та коректно отримати замкнуті рівняння нелінійного вихрового динамо для однорідної рідини та стратифікованої атмосфери. Доведено, що наявність сили Коріоліса та зовнішньої дрібномасштабної сили призводить до α -нестійкості, що виникає за наявності нахилу осі обертання. Ця умова є критичною для розвитку нестійкості у неспіральному випадку сил. Отримано нові стаціонарні розв'язки у вигляді спіральних кінків, нелінійних хвиль Бельтрамі. Показано, що стратифікація та вологість атмосфери суттєво збільшують генерацію великомасштабних вихрових структур. Для нанорідин виявлено новий механізм генерації великомасштабних вихрових структур під дією параметричного впливу дрібномасштабної сили.

Другий розділ присвячено формуванню великомасштабних магнітних та вихрових структур у електропровідних середовищах, що обертаються, під впливом дрібномасштабної зовнішньої сили. Побудовано теорію магнітовихрового динамо, у якій генерація вихрових і магнітних структур зумовлена нестійкостями типу гідродинамічного та магнітогідродинамічного α -ефектів. Показано, що відхилення осі обертання сприяє виникненню регулярних і хаотичних структур. У стратифікованих середовищах виведено замкнені рівняння нелінійної еволюції великомасштабних полів. Доведено існування стаціонарних рішень у вигляді нелінійних хвиль, кінків і солітонів. У межах електронної магнітогідродинаміки виявлено нову α -нестійкість у плазмі, яка виникає під впливом нахиленого магнітного поля та термомагнітних ефектів. Показано, що параметр Нернста істотно впливає на розвиток генерації великомасштабних магнітовихрових структур.

У третьому розділі побудовано теорію магнітної конвекції в електропровідному середовищі, що неоднорідно обертається в аксіальному магнітному полі. Для профілів обертання з від'ємними значеннями числа Россбі спостерігається зменшення критичних значень числа Релея як для стаціонарної, так і для коливальної конвективної нестійкості. Створена слабонелінійна теорія стаціонарної конвекції, що описується рівнянням Ландау. Отримано шестивимірну систему нелінійних рівнянь для амплітуд коливань швидкості, температури та магнітного поля, динаміка якої демонструє хаос та інверсії магнітного поля, що підтверджено за допомогою показників Ляпунова та фрактальної розмірності. Визначено, що модуляція обертання найбільш суттєво впливає на теплоперенесення. Наступною за впливом є гравітаційна модуляція, що ефективніша за магнітну. Визначено суттєвість впливу струму Холла, броунівської дифузії й термофорезу та доведено, що збільшення числа Льюїса, модифікованого коефіцієнта дифузії та концентраційного числа Релея сприяє швидшому виникненню конвекції.

Четвертий розділ зосереджено на вивченні магнітогідродинамічної конвекції в електропровідних середовищах, що обертаються, під впливом спірального магнітного поля. Такі поля відрізняються топологічною нетривіальністю та мають зчеплені силові лінії магнітних полів. Установлено, що спіральність зменшує критичні значення нестійкості незалежно від характеру обертання, що свідчить про дестабілізувальний вплив спіральної компоненти. Виведено нову восьмикомпонентну систему рівнянь для амплітуд коливань температури, швидкості та магнітних полів для слабонелінійної конвекції в спіральному магнітному полі. Виявлено дивний атрактор, обчислено показники Ляпунова та фрактальну розмірність цієї системи. Проведено моделювання цієї системи у програмних середовищах Matlab, LabVIEW та Multisim. Для нанорідин у спіральному полі ідентифіковано три види магнітообертальної нестійкості (аксіальну, азимутальну, спіральну), знайдено критичні параметри, з'ясовано, що наночастинки зменшують поріг нестійкості. У випадку конвекції в такому складному пористому середовищі Дарсі-Брінкмана виявлено умови виникнення структур: аксіальна компонента поля та обертання сприяють стабілізації режиму, азимутальна – призводить до дестабілізації. Визначено залежність стійкості конвективних процесів від типу наночастинок.

П'ятий розділ зосереджено на визначенні умов формування структур у неоднорідних електропровідних середовищах із урахуванням термомагнітних явищ. Проаналізовано дисперсійні співвідношення для малих збурень у рідині з неоднорідним обертанням у аксіальному магнітному полі. За відсутності зовнішнього магнітного поля виявлено ефект спонтанної генерації магнітного поля в слабонеоднорідному середовищі з колінеарними градієнтами питомої термо-ЕРС та температури завдяки термомагнітній нестійкості, що виникає внаслідок домінування ефекту Ледюка – Рігі над теплопровідним і в'язкісним загасанням у високопровідному режимі. За наявності зовнішнього магнітного поля генерація магнітного поля в слабонеоднорідному електропровідному середовищі з колінеарними градієнтами питомої термо-ЕРС та температури зумовлена домінуванням ефекту Нернста над теплопровідним та в'язкісним загасанням. З'ясовано новий ефект генерації тороїдального магнітного поля в тонкому шарі електропровідної рідини з колінеарними градієнтами температури та питомої термо-ЕРС у зовнішньому вертикальному магнітному полі. Розв'язання отриманого нелінійного рівняння типу Ландау для описування слабонелінійної конвективної нестійкості з урахуванням термомагнітних ефектів показує насичення генерації тороїдального магнітного поля на стаціонарному рівні. Виявлено хаотичну динаміку та інверсії генерованого тороїдального магнітного поля термомагнітною нестійкістю в отриманій шестикомпонентній системі нелінійних рівнянь, яка може бути альтернативною моделі Рікітаке в теорії геомагнетизму. У тонкому шарі плазми отримано новий тип термомагнітної нестійкості, викликаної градієнтом температури та сильним гравітаційним полем. Оцінки збуджуваних магнітних полів добре узгоджуються з даними магнітних полів у нейтронних зірках. Виявлено новий нетривіальний ефект генерації магнітного поля в низькотемпературній замагніченій плазмі з паралельними градієнтами густини та температури. У цьому випадку теплопровідність має менший вплив, ніж для випадку незамагніченої плазми, і тому магнітотеплові збурення наростають навіть у короткохвильовій межі.

У шостому розділі виконано комплексне дослідження біотермальної конвекції в тонких рідинних шарах на основі поєднання фізичних та мікробіологічних факторів впливу, які створюють нові незвичайні можливості управління динамічною поведінкою структур у середовищах із активною біологічною компонентою.

Установлено, що активність мікроорганізмів (швидкість плавання, гіротаксис) та посилення температурного градієнта прискорюють перехід від базового стаціонарного розподілу до структурованих біоконвективних патернів. Натомість сферична форма мікроорганізмів і висока в'язкість середовища уповільнюють цей процес, утримуючи систему довше у квазістаціонарному базовому стані. Було виявлено ефекти, унаслідок яких збільшення частоти модуляції пригнічує дрібномасштабні теплові флуктуації, що відповідає стабілізації базового стану. Показано, що підвищення амплітуди модуляції підсилює теплові потоки, сприяючи формуванню впорядкованих конвективних структур у вигляді стійких комірок типу Релея – Бенара.

Крім того, установлено, що вертикальний потік проти гравітації посилює тепломасоперенесення, що сприяє прискореному формуванню конвективних структур, а потік за гравітацією пригнічує ці структури. Магнітне поле та в'язкість діють як фактори стабілізації, тобто структури стають більш стійкими. Навпаки, збільшення концентрації мікроорганізмів дестабілізує систему, що сприяє утворенню складніших ієрархічних структур. Показано, що під дією швидкого обертання збурення згасають, і система формує впорядковані патерни у вигляді стовпчастих структур, витягнутих уздовж осі обертання. Установлено, що внутрішнє нагрівання дестабілізує систему, сприяючи переходу до хаотичної конвекції.

Теплова модуляція по-різному впливає залежно від фази модуляції. У разі синфазної модуляції система еволюціонує майже як без модуляції: структури швидко виходять на стаціонарний рівень. У випадках протифазної модуляції та модуляції на нижній межі виникає коливальний режим еволюції структур: патерни то посилюються, то слабшають, причому

протифазна модуляція формує більш виражені та інтенсивні структури, ніж модуляція на нижній межі.

Із наведеного випливає, що в дисертаційній роботі М. Й. Коппа **отримано низку нових вагомих теоретичних результатів** фундаментального характеру, що мають велике значення для практичних застосувань не лише в галузі астро- та геофізики, а й у системах зв'язку, біології чи медицині.

Дисертація добре структурована, має логічний зв'язок між розділами та підрозділами, написана чіткою науковою мовою. Новизна та наукове значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Результати роботи опубліковано в 30 статтях у фахових вітчизняних і міжнародних журналах, а також у одному розділі збірника наукових праць. Результати дисертаційного дослідження були представлені на 8 міжнародних конференціях. Серед опублікованих робіт: 3 статті надруковано в наукових журналах першого квартиля (Q1), 5 – у журналах другого квартиля (Q2), 9 – у виданнях третього квартиля (Q3) та 12 – у виданнях четвертого квартиля (Q4) відповідно до класифікації SJR (SCImago Journal Rank).

Дисертація **відповідає спеціальності 01.04.02 – «теоретична фізика».**

Дисертація М. Й. Коппа є закінченою науковою працею, у якій **отримано низку нових вагомих теоретичних результатів** фундаментального характеру, що мають велике значення для практичних застосувань не лише в галузі астро- та геофізики, а також можуть бути використані в системах зв'язку, біології чи медицині. У роботі вирішено важливу наукову проблему теоретичної фізики, а саме побудову теоретичного опису генерації нелінійних структур в гідродинамічних середовищах під впливом зовнішніх полів.

Достовірність і обґрунтованість результатів, отриманих у дисертації, не викликає сумнівів, оскільки забезпечується використанням сучасних аналітичних та числових методів дослідження: методу багатомасштабного розкладу, теорії слабонелінійної конвекції, асимптотичних і варіаційних підходів, а також методів нелінійної динаміки й теорії стійкості. Отримані результати збігаються з загальновідомими результатами у відповідних граничних випадках і можуть бути використані під час проведення теоретичних робіт у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України (м. Харків), Харківському національному університеті ім. В. Н. Каразіна МОН України, Інституті монокристалів НАН України (м. Харків), Радіоастрономічному інституті НАН України (м. Харків), Київському національному університеті ім. Т. Шевченка, а також у закордонних лабораторіях.

Автореферат повністю відображає зміст і основні положення дисертаційної роботи.

Щодо **змісту** дисертації можна зробити такі зауваження.

1. Поєднання матеріалу стосується застосування теорії виникнення дисипативних структур у межах використання теорії магнітогідродинаміки для плазми та нанорідин, рідин із мікроорганізмами. Автору слід було б детальніше пояснити зв'язок розділів, що описують занадто різні системи, як на макро-, так і мікрорівні.
2. Під час дослідження хаотичних режимів у відповідних розділах автором розглянуто лише єдиний можливий вибір параметрів системи, коли реалізується хаос і кількість індикаторів хаосу обмежується здебільшого показниками стійкості стаціонарних точок, перетином Пуанкаре та кореляційною функцією. Натомість доцільно було б проаналізувати інтервали керуючих параметрів із виникненням хаосу та навести карту старших показників Ляпунова в просторі значень керуючих параметрів чи/або початкових умов, що показують саме розбіжність траєкторій. Це могло б підсилити наведені твердження про хаотичність досліджуваних режимів.
3. У дисертації розглянуто різні типи гармонійної модуляції в конвективних середовищах різної природи. Зроблено висновок, що гармонічна модуляція зменшує тепловіддачу зі зростанням частоти. Доцільно було б дати фізичне пояснення цього явища, оскільки

наразі не зовсім зрозуміло, чому високочастотна модуляція має пригнічувати процес теплоперенесення.

4. У дисертаційному дослідженні широко використано підхід слабонелінійного аналізу, проте відсутні результати, які б показували, як системи поведуться у сильно-нелінійному режимі, де асимптотичні методи вже не працюють.

Загальні зауваження **щодо оформлення та подання** результатів дисертаційного дослідження

1. Робота містить значну кількість одруківок, наприклад, «обурення» замість збурення, «висоти» замість висоти (с. 121, 123, 142) тощо. Застосовано некоректні мовні вирази, наприклад, «осередки» замість комірки (с. 2, 178, 193, 308, 394, 414), «хвилове число» замість хвильове число, «чисельні методи / результати» замість числові методи / результати (по тексту роботи). Назви рисунків у тексті написано з великої літери «Рис. (номер рисунка)», у оформленні рисунків використано латиницю (наприклад, «Рис. 2.1 a,b» на с. 110 тощо по тексту). Речення з описом рисунків у тексті інколи не містять прийменників (с. 130, 131, 195, 200, 228, 241, 258, 259, 312) і розуміються як лінгвістично помилкові.
2. У тексті роботи є певна кількість російнізмів, наприклад, «магнітоврацательне» замість магнітообертальне (с. 103), «вращательного руху» замість обертального (с. 104), «несжимаємої» замість нестискуваної (с. 236, 265), «термодедс» замість термо- ЕРС (с. 287, 301, 308), «електродвіжуча сила» замість електрорушійна сила (с. 324).
3. По тексту роботи некоректно записано порівняння похідних за простором без уведення масштабів по кожній координатній осі (наприклад, у підрозділі 1.1.2 на с. 62), аналогічне зауваження стосується розгляду стаціонарного режиму з визначенням похідної за часом (наприклад, на початку підрозділу 1.1.3, с. 64, с. 68, с. 74, с. 83, с. 90, підрозділ 2.6.3 на с. 173).
4. Під час розгляду, наприклад, слабонелінійної конвективної нестійкості (у підрозділах 3.2.3, 3.4.3 і далі в тексті) рівняння для амплітуд (3.25, 3.42) позначено як рівняння Гінзбурга – Ландау, хоча це рівняння Ландау, оскільки не містить просторової лапласіанівської компоненти для часово-залежної амплітуди. Аналогічне зауваження стосується відповідних пояснень у підрозділах 5.2.3 (с. 316, рівняння (5.48)), 6.2.1 (рівняння (6.17)), 6.5.1 (рівняння (6.74)) та 7.1 (рівняння (6.113)).
5. У розділах 3, 4 та 5 автор говорить про синтез та можливу реалізацію хаотичних режимів у межах використання розроблених для систем нелінійних рівнянь блок-схем у системі LabVIEW та електронних схем генераторів хаотичних коливань. Однак відповідний опис до них, окрім констатацій у тексті роботи відсутній, зокрема (рис. 3.6, 3.7, 4.4, 4.5, 5.12, 5.13), що ускладнює сприйняття поданого матеріалу. На мій погляд, такий матеріал пояснень можна було б винести в додатки до роботи.

До **Анотації** є декілька зауважень виключно щодо оформлення та подання, зокрема: на с. 3 є певні одруки, наприклад, «призводить до посилення» замість приводить до посилення; використано терміни «дуже низькою електропровідністю», та не наведено у порівнянні з чим (с. 4); «слабке» та «сильне» магнітне поле – не наведено порівняно з чим; незрозумілим є введення позначень для певних величин, які не використовуються в Анотації після їх уведення та у Змісті роботи до введення переліку умовних позначень, де ці позначення не наведено.

Зауваження до **Вступу**

1. Автор говорить про низку отриманих підтверджень реалізації магнітогідродинамічного альфа-ефекту з посиланням на літературні джерела, а опису цих підтверджень не наведено, у зв'язку з чим виникає питання про те, що слугувало причиною подальшого дослідження у цій галузі (с. 40).

Зауваження до **Розділу 1**

1. У підрозділі 1.1.2 доцільно було б пояснити перехід від основних динамічних рівнянь до наближених рівнянь великомасштабного вихрового поля (1.6). Після виразу (1.8) математично некоректно записано порівняння похідних за простором без уведення масштабів по кожній координатній осі. Аналогічне зауваження стосується похідної за часом на початку підрозділу 1.1.3 (с. 64), також на с. 68, 74, 83, 90. У підрозділі 1.6.1 опис нововведених величин у системі (1.60–1.64) автор проводить лише після анонсування умов задачі та основних рівнянь, що ускладнює розуміння математичного формулювання задачі дослідження.

Зауваження до **Розділу 2**

1. Доцільно було б навести декілька навіть найпростіших моделей із функціональною залежністю коефіцієнтів підсилення та турбулентної магнітної в'язкості з відповідними посиланнями на с. 103 та коротко навести спосіб отримання системи рівнянь (2.5–2.8).
2. У підрозділі 2.2.3 автором розглядається хаотичний режим руху, де аналіз хаотичної динаміки проводиться за допомогою перетину Пуанкаре та спадання кореляційної функції за певного вибору параметрів системи. Проте автор не пояснює сценарій переходу до хаосу під час описування перетинів Пуанкаре.

Зауваження до **Розділу 3**

1. Автор використовує метод Венцеля-Крамерса-Бріллюена, але не наводить пояснення щодо умов його застосування, окрім того, наводиться лише відповідна аббревіатура без посилання на першоджерело (наприклад, с. 185).
2. У підрозділі 3.3.2 використано невдале пояснення фрактальної розмірності хаотичного атратора (с. 204). Окрім того, твердження про хаотичність атратора слід було б підкріпити додатковими дослідженнями індикаторів хаосу в певній області значень основних параметрів, зокрема, аналізом розбіжностей траєкторій, ентропією Колмогорова-Сіная тощо.
3. На с. 225 не зрозуміло, з якої причини частина тексту абзацу написана російською мовою.

Зауваження до **Розділу 4**

1. Розділ 4 містить певні лексичні та синтаксичні помилки, що сталися, вочевидь, під час перекладу матеріалу з англійської мови, зокрема, у вступі до розділу 4 на с. 234 лексично невдало сформульовано важливість дослідження турбулентності течії рідких металів під час їх кристалізації; формули (4.27, 4.28) містять англомовні текстові коментарі.

Зауваження до **Розділу 5**

1. На мій погляд, залежності на рис. 5.9 корисно було б подати у напівлогарифмічних осях, оскільки ряд значень на вертикальній осі відрізняється на декілька порядків, що унеможлиблює сприйняття двох наведених на рисунку залежностей у поданий атором спосіб.

Зауваження до **Розділу 6**

1. Під час порівняння отриманих автором результатів із результатами інших досліджень (наприклад, на с. 359) доцільно було б навести, де і в який спосіб відбувається узгодження, за яких критеріїв тощо.
2. Описуючи вплив форми чи морфології мікроорганізмів на характер біотермічної конвекції, автор говорить про «відкриття». Чи дійсно ми тут маємо справу з реальним відкриттям чи надане формулювання є артефактом перекладу українською мовою?
3. На с. 415-416 наведено невдале формулювання порівняння власних результатів щодо поведінки числа Нуссельта з результатами, викладеними у статті, де дисертант є автором, і результати цієї ж роботи виносяться на захист.

Втім, наведені зауваження мають рекомендаційний характер та стосуються здебільшого оформлення та подання результатів у тексті роботи, а тому не впливають на важливість отриманих результатів і загальний високий рівень проведеного дисертаційного дослідження.

Беручи до уваги актуальність теми дисертації, наукову значущість і новизну отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, вважаю, що дисертація «Генерація нелінійних структур в гідродинамічних середовищах під впливом зовнішніх полів» повністю задовольняє вимоги до докторських дисертацій, зокрема, пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 1197 від 17.11.2021 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 502 від 19.05.2023 та № 507 від 03.05.2024), а її автор Копп Михайло Йосипович, безумовно, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач відділу моделювання
радіаційних ефектів та мікроструктурних
перетворень у конструкційних матеріалах
Інституту прикладної фізики НАН України

Д. О. Харченко

Підпис засвідчую:

Д. О. Харченко
Генеральний секретар ІПФ НАН України

Дорошина Олексій
