

офіційного опонента на дисертаційну роботу Коппа Михайло 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

Актуальність вибраної теми. Сучасний етап розвитку фізики складних систем характеризується інтенсивним вивченням процесів самоорганізації у різноманітних середовищах, включаючи нанорідини, біоактивні системи, плазму та рідини в пористих середовищах. Особливості мікроструктури цих середовищ та взаємодія із зовнішніми полями (магнітним, гравітаційним і температурним) призводять до виникнення нових типів структур, які істотно впливають на процеси теплоперенесення та масообміну. Розробка нових теоретичних моделей є критично важливою для адекватного опису фізичних процесів у широкому спектрі прикладних галузей, включаючи астрофізику, геофізику, енергетику, сучасні технології охолодження, процеси очищення рідин та створення функціональних матеріалів із заданими властивостями. Незважаючи на значний прогрес у розумінні окремих аспектів, цілісна теорія генерації та еволюції складних структур у неоднорідних середовищах відсутня. Таким чином, дослідження закономірностей виникнення, еволюції та стійкості просторово-часових структур у різних гідродинамічних середовищах під дією зовнішніх факторів є **актуальним напрямом досліджень**, що має як фундаментальне, так і прикладне значення для удосконалення сучасних технологій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг роботи становить 462 сторінки. Дисертація містить 143 рисунка, 8 таблиць і список використаних джерел з 290 найменувань.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, зв'язок с науковими програмами, сформульовано мету і задачі дослідження, об'єкт, предмет і методи дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, відображено особистий внесок автора, наведено відомості про апробацію результатів роботи.

Перший розділ присвячено теоретичному аналізу генерації великомасштабних вихрових структур у середовищах, що обертаються, під дією дрібномасштабних зовнішніх сил. Використано багатомасштабний асимптотичний метод, який дозволяє здійснювати послідовний аналіз еволюції полів на різних просторово-часових масштабах у кожному порядку розкладу за малим параметром числа Рейнольдса. В третьому порядку розкладу отримано замкнені рівняння нелінійного вихрового динамо в середовищах, що обертаються, а саме для однорідної рідини, стратифікованої атмосфери та нанорідини. Встановлено, що генерація відбувається через розвиток нестійкості типу α -ефекту, яка виникає під дією сил Коріоліса та зовнішньої

дрібномасштабної сили. Для випадку неспіральної сили доведено, що необхідною умовою генерації є відхилення осі обертання від вертикалі, що робить генерацію малоймовірною на полюсах і найбільш імовірною в екваторіальній зоні. На нелінійній стадії розвитку нестійкості виявлено локалізовані стаціонарні структури: спіральні кінки та нелінійні хвилі Бельтрамі. Особливо цікавим є врахування ефектів стратифікації у сухій і вологій атмосфері. Доведено, що підігрів і додаткове конденсаційне тепловиділення, створюють сприятливі умови для генерації вихрових структур. Вперше передбачено новий механізм генерації у стратифікованих нанорідинах за рахунок підвищення концентрації наночастинок, навіть без градієнта температури. При цьому зростання частоти параметричного впливу зменшує ефективність генерації, що відкриває перспективу керування процесом вихрового динамо.

Другий розділ присвячений дослідженню механізмів формування великомасштабних вихрових і магнітних структур в електропровідних середовищах. Побудовано самоузгоджену теорію магніто-вихрового динамо для середовищ, що обертаються під дією дрібномасштабної сили. Встановлено, що генерація вихрових і магнітних полів відбувається незалежно одна від одної: вихрові структури формуються за рахунок гідродинамічного α -ефекту, а магнітні - за рахунок магнітогідродинамічного α -ефекту. Отримані стаціонарні рішення описують локалізовані структури: спіральні кінки, нелінійні хвилі Бельтрамі. Також отримано нові цікаві результати нелінійної теорії динамо, що демонструють виникнення як регулярних, так і хаотичних структур великомасштабних вихрових та магнітних полів. Показано, що у температурно-стратифікованих середовищах α -ефекти можуть виникати навіть при малих числах Рейля, а при дрібномасштабній спіральності поля швидкості і магнітного поля одночасно існують декількох нестійких мод. Встановлено критерій коли зовнішнє магнітне поле пригнічує генерацію вихрових і магнітних структур. В температурно-стратифікованій, повністю іонізованій плазми виявлено нову великомасштабну нестійкість α -ефекту, що залежить від нахилу зовнішнього магнітного поля та величини параметра Нернста; збільшення параметра Нернста гальмує розвиток великомасштабної нестійкості.

У третьому розділі досліджено магнітну конвекцію в шарі електропровідної рідини, що неоднорідно обертається. Побудовано лінійну теорію конвективної нестійкості тонкого шару електропровідної рідини в однорідному вертикальному магнітному полі для осесиметричних збурень та встановлено критерії їх стійкості, згідно з якими стабілізуючими факторами є вертикальне магнітне поле, параметр неоднорідного обертання з позитивними числами Россбі та вертикальний температурний градієнт для випадку сталої стратифікації. Було встановлено цікавий ефект, що для профілів неоднорідного обертання з від'ємними числами Россбі ($Ro < 0$) пороги стаціонарної та коливальної конвективної нестійкості знижуються. Побудована слабонелінійна теорія стаціонарної конвекції яка описується рівнянням Гінзбурга-Ландау, що

дозволяє досліджувати еволюцію амплітуд збурень та формування конвективних структур. Отримано шестивимірну (6D) систему нелінійних рівнянь для амплітуд коливань швидкості, температури та магнітного поля, динаміка якої демонструє хаотичну поведінку та інверсії магнітного поля. Встановлено, що модуляція обертання має найбільший вплив на інтенсивність теплоперенесення та формування конвективних структур, тоді як гравітаційна модуляція діє сильніше, ніж модуляція магнітного поля. Зниження порогу конвективної нестійкості виявляється пов'язаним зі збільшенням концентрації наночастинок. За відсутності градієнта температури в шарі нанорідини, що неоднорідно обертається, в аксіальному магнітному полі виникає магнітообертальна нестійкість. Виявлено, що ефект Холла сприяє перекачуванню енергії з обертання в магнітні збурення, що прискорює розвиток магнітообертальної нестійкості.

Четвертий розділ присвячений дослідженню магнітогідродинамічної конвекції в електропровідних середовищах, що обертаються, в спіральному магнітному полі. Виявлено цікавий ефект, що азимутальна складова спірального магнітного поля дестабілізує систему при позитивних значеннях магнітного числа Россбі $Rb > 0$. Побудовано нову 8-вимірну (8D) слабонелінійну динамічну систему, яка має дивний атрактор, що свідчить про хаотичний характер нелінійної конвекції. Особливої уваги заслуговує відкриття нового сімейства магнітообертальних нестійкостей у нанорідинах (стандартної, азимутальної та спіральної); встановлено істотне розширення областей нестійкості та зниження критичного числа Релея внаслідок дестабілізуючої ролі наночастинок. У пористому середовищі Дарсі-Брінкмана вперше виявлено новий тип нестійкості у тонкому шарі нанорідини у спіральному магнітному полі, а також визначено вплив аксіальної та азимутальної складових поля на стійкість конвекції.

П'ятий розділ присвячено дослідженню формування структур у неоднорідних електропровідних середовищах із урахуванням термомагнітних (ТМ) ефектів. Встановлено нові критерії для ТМ нестійкості в умовах неоднорідного обертання та зовнішнього аксіального магнітного поля. Виявлено, що ефекти Холла, Нернста та Ледюка-Рігі можуть істотно змінювати пороги нестійкості залежно від напрямку поширення збурень. Доведено, що ТМ-ефекти дестабілізують систему, і поріг розвитку нестійкості знижується для будь-якого профілю обертання. Для опису слабонелінійної конвективної нестійкості в електропровідних середовищах, що неоднорідно обертаються, в аксіальному магнітному полі було отримано нелінійне рівняння типу Гінзбурга-Ландау з урахуванням ТМ-ефектів. Аналітичне рішення цього рівняння демонструє вихід генерованого тороїдального магнітного поля на стаціонарний рівень. Особливий інтерес становлять режими конвекції для кеплерівського профілю ($Ro = -3/4$), при яких вперше виявлено хаотичні зміни амплітуди і напрямку збурень генерованого магнітного поля. Також знайдено новий тип ТМ-нестійкості в стратифікованому тонкому шарі електронної рідини (плазмі) у сильному гравітаційному полі, що призводить до спонтанної генерації

магнітного поля. Визначено умови виникнення нестійкостей та генерації магнітних полів у слабонеоднорідній замагніченій плазмі з колінеарними градієнтами щільності та температури електронів.

Шостий розділ присвячений дослідженню біотермальної конвекції в тонких шарах рідин. Встановлено фундаментальні закономірності впливу параметрів мікроорганізмів на конвективну стійкість: швидкість руху мікроорганізмів (число Пекле), гіротаксис і температурний градієнт (число Релея-Дарсі) знижують поріг біотермальної нестійкості, тоді як ефективна в'язкість (число Дарсі) та кутова швидкість обертання (число Тейлора) стабілізують систему. Виявлено ефект частотного впливу гармонічної модуляції: збільшення частоти модуляції Ω призводить до зменшення тепловіддачі внаслідок того, що швидкі коливання не встигають повністю перебудувати конвективну структуру, тоді як збільшення амплітуди модуляції посилює теплообмін через більш інтенсивне перемішування рідини. Встановлено, що сферична форма мікроорганізмів забезпечує найбільш ефективний процес теплопередачі завдяки мінімальному гідродинамічному опору та оптимальній площі поверхні теплообміну. У дослідженні магнітної конвекції встановлено стабілізуючий вплив вертикального магнітного поля через силу Лоренца. Для опису регулярної та хаотичної поведінки біорідинних систем побудовано шестивимірну нелінійну модель біотермальної конвекції типу динамічних рівнянь Лоренца. Досліджено роль теплової модуляції у конвекції в середовищі з термотактичними мікроорганізмами.

Достовірність і обґрунтованість результатів, підтверджується використанням перевірених методів теоретичної гідродинаміки, математичної фізики та нелінійної динаміки, а саме метод багатомасштабних асимптотичних розкладів, методи теорії збурень, теорія детермінованого хаосу, якісний аналіз динамічної поведінки диференціальних систем рівнянь. Крім того, застосовувалося чисельне моделювання із використанням сучасного програмного забезпечення. Результати, що здобуті у відповідних граничних випадках, узгоджуються з відомими раніше.

Зауваження, які виникли під час рецензування дисертаційної роботи

1. У розділах 1 і 2 досліджується генерація нелінійних вихрових і магнітних структур у середовищах, що обертаються, під дією зовнішньої дрібномасштабної сили. Ця сила задана детермінованим чином і може мати спіральні або неспіральні властивості, відповідно збуджуючи дрібномасштабні осциляції швидкості з такою ж топологією. У дисертації розглядається три типи зовнішньої детермінованої дрібномасштабної сили: два типи зі спіральністю та один тип із нульовою спіральністю. Доцільно було б відзначити, що зовнішню дрібномасштабну силу можна задати також статистично з корелятором у явному вигляді, однак у цьому випадку обчислення кореляційних функцій значно ускладнюються порівняно з динамічним завданням зовнішньої сили.

2. У дисертації доведено існування стаціонарних розв'язків у вигляді нелінійних хвиль, кінків та солітонів, однак їхню стійкість не проаналізовано. На мою думку доцільно було б провести детальніший аналіз лінійної стійкості знайдених розв'язків відносно малих збурень.
3. У розділі 3.4 графічно подано чисельні результати, що ілюструють порівняння ефективності різних типів модуляції - обертання, гравітації (поля тяжіння), магнітного поля та температури. Доцільно було б доповнити аналіз кількісними критеріями для оцінки відносної ефективності кожного виду модуляції.

Однак слід відзначити, що вказані зауваження носять здебільш рекомендаційний характер і не стосуються головних теоретичних і практичних висновків дисертації М. Й. Коппа і не зменшують загальної значущості роботи. Вважаю, що дисертаційна робота М. Й. Коппа є завершеною науковою працею і свідчить про високий кваліфікаційний рівень самого дисертанта. Дисертаційна робота М. Й. Коппа відповідає встановленим вимогам до її оформлення. Автореферат дисертації повно і вірно відображає основні положення дисертації. Дослідження, проведені в дисертації, є актуальними і можуть бути використані як у фундаментальних, так і в прикладних дослідженнях з фізики, астрономії, біології, метеорології та медицини.

Враховуючи актуальність теми, новизну отриманих результатів, наукову та практичну значимість роботи, достовірність та обґрунтованість висновків, вважаю, що дисертація Коппа Михайла Йосиповича «Генерація нелінійних структур в гідродинамічних середовищах під впливом зовнішніх полів» повністю відповідає всім вимогам, які пред'являються до докторських дисертацій «Порядком присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженим постановою Кабінету Міністрів України № 1197 від 17.11.2021 р. (зі змінами, внесеними згідно Постанов КМУ № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р., № 928 від 30.07.2025 р.), а здобувач заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Провідний науковий співробітник відділу теорії конденсованих середовищ і ядерної матерії Інституту теоретичної фізики імені О. І. Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, старший науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук



А. А. Туркін

Підпис А.А.Туркіна засвідчую
Т. в. о. директора ІТФ ім. О.І.Ахієзера ННЦ ХФТІ



Л. М. Давидов