

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МОНОКРИСТАЛІВ**

КОПІ МИХАЙЛО ЙОСИПОВИЧ

УДК 532.517:533.951:532.546

**ГЕНЕРАЦІЯ НЕЛІНІЙНИХ СТРУКТУР В ГІДРОДИНАМІЧНИХ
СЕРЕДОВИЩАХ ПІД ВПЛИВОМ ЗОВНІШНІХ ПОЛІВ**

01.04.02 - теоретична фізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

Харків – 2026

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті монокристалів НАН України.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор,
академік НАН України,
Лев Богдан Іванович,
Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова
НАН України, відділ синергетики,
головний науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий
співробітник,
Туркін Анатолій Аркадійович,
Інститут теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера ННЦ
«Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,
відділ теорії конденсованих середовищ і ядерної матерії,
провідний науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук, професор
Харченко Дмитро Олегович,
Інститут прикладної фізики НАН України,
завідувач відділу моделювання радіаційних ефектів та
мікроструктурних перетворень у конструкційних
матеріалах.

Захист відбудеться 25 березня 2026 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.845.02 Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108 м. Харків, вул. Академічна, 1 та на офіційному сайті ННЦ ХФТІ.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

А.І. Кірдин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Одним із провідних напрямів сучасних досліджень гідродинамічних середовищ є вивчення механізмів виникнення впорядкованих та хаотичних просторово-часових структур у середовищах, що перебувають під дією зовнішніх впливів. Формування таких структур відбувається як у класичних, так і в складних середовищах, зокрема - у нанорідинах, рідинах в пористих матрицях, середовищах з мікроскопічними саморухомими об'єктами, а також у плазмових системах. У кожному з цих випадків спостерігається широкий спектр явищ, що охоплюють нестійкості, локалізовані моди, автоколивальні процеси, турбулентні режими та самоорганізовані структури.

Теоретичні основи вивчення структуроутворення в гідродинамічних середовищах були закладені в класичних роботах Ландау [1*], Лайтхілла [2*] та інших піонерів у галузі гідродинамічної стійкості. Подальший розвиток отримали завдяки працям Кроса та Хохенберга [3*], які запропонували універсальний підхід до опису утворення структур поблизу порогу нестійкості. Сучасне розуміння нелінійної динаміки структур значною мірою базується на роботах Ньюелла та Уїтхема [4*], а також на концепціях, розвинутих у монографії Манневвілля [5*].

Особливої уваги потребує аналіз нелінійних структур, які не піддаються опису в рамках лінійних теорій через складні взаємодії, що відбуваються між різними модами збурень. Такі структури суттєво впливають на ефективні властивості середовища, зокрема теплоперенесення та масообмін, і водночас самі можуть бути чутливими до змін зовнішніх впливів. Нелінійні ефекти в конвективних системах детально розглянуто в монографіях Гетлінга [6*] та Буссе [7*], які показали важливість врахування взаємодії між різними модами збурень для правильного опису складних конвективних режимів.

Дослідження процесів структуроутворення в різноманітних середовищах є важливим і динамічно зростаючим напрямком сучасної науки. Одними з перших та практично значущих середовищ, у яких ці дослідження почали активно розвиватися, були пов'язані з генерацією великомасштабних вихрових і магнітних полів. Фундаментальні роботи Штеенбека, Краузе та Редлера [8*], а також Паркера [9*] заклали основи теорії динамо [10*]-[12*] та показали можливість генерації магнітних полів турбулентними рухами електропровідного середовища.

Відомо, що в астрофізичних умовах плазма перебуває в турбулентному стані. Останнім часом отримано нові дані щодо властивостей дрібномасштабної структури турбулентності, яка тісно пов'язана з великомасштабними потоками. Зокрема, описано такі явища, як самоорганізація дрібномасштабних вихрових структур у великомасштабні утворення, а також кластеризація вихрових і магнітних структур. Ці процеси детально розглянуті в роботах Фріша [13*], Моніна та Яглома [14*], а також у сучасних оглядах Тобіаса та інших [15*].

Дослідження генерації великомасштабних вихрових і магнітних структур

спіральною турбулентністю в гідродинамічних середовищах ведуться вже кілька десятиліть. Отримано низку важливих експериментальних підтверджень реалізації магнітогідродинамічного α -ефекта в роботах Гайлітіса та співавторів [16*], а також у дослідженнях групи Стіглица [17*]. Теоретичні аспекти цих ефектів розглянуті в монографії Зельдовича та ін. [18*], а також Краузе та Редлера [19*].

Однак досі відсутня повноцінна самоузгоджена нелінійна теорія генерації вихрових та магнітних структур у плазмових середовищах, що викликає значний інтерес до цієї проблематики в контексті фундаментальних досліджень. Особливо актуальними є питання, пов'язані з нелінійним насиченням динамо-процесів та їх зворотним впливом на турбулентну структуру середовища, які розглядаються в сучасних роботах Бранденбурга [20*] та Чайлдреса і Соварда [21*].

З появою активної матерії та нових гідродинамічних середовищ, таких як біо- та нанорідини, природно виникає потреба у вивченні можливостей генерації нелінійних структур у таких складних середовищах. Теоретичні основи поведінки нанорідин закладені в роботах Чоя [22*] та Істмана і співавторів [23*], які показали аномальне підвищення теплопровідності при додаванні наночастинок. Гідродинамічні властивості нанорідин детально вивчені Буонджорно [24*], який запропонував модель, що враховує броунівський рух та термофорез наночастинок.

Очевидно, що в подібних середовищах можуть з'явитись нові фізичні ефекти, зумовлені їх мікроструктурою та специфічними властивостями наночастинок. Такі середовища є перспективними з точки зору широкого спектра промислових застосувань. Конвективні процеси в нанорідинах розглянуті в роботах Цоу [25*], Нілда та Кузнецова [26*], які показали можливість як стабілізації, так і дестабілізації конвекції залежно від властивостей наночастинок.

Особливий інтерес становлять також пористі середовища, які, завдяки своїй складній внутрішній геометрії, є ще більш привабливими як з позицій фундаментальних проблем, так і з огляду на потенціал практичного застосування. Конвективні процеси в пористих середовищах систематично розглянуті в монографіях Нілда та Бежана [27*], а також Інгама та Попа [28*]. Ефекти локальної термічної нерівноважності між твердою матрицею та рідиною детально вивчені в роботах Мінковича та Калурі [29*].

Важливим напрямом сучасної фундаментальної науки є дослідження впливу зовнішніх змінних полів на біоконвективні процеси за участю мікроорганізмів з різною природою таксису. Піонерські роботи з біоконвекції виконані Плеттом [30*] та Чайлдресом і співавторами [31*], які показали можливість утворення регулярних структур за рахунок колективної поведінки мікроорганізмів. Сучасні дослідження біоконвективних процесів представлені в оглядах Педлі та Кесслера [32*], а також Хілла та Педлі [33*].

Додатковий інтерес до проблеми структуроутворення викликають активні середовища, що складаються з саморухомих частинок. Теоретичні основи динаміки таких систем розвинуті в роботах Тонера та Ту [34*], а також Шейка та ін. [35*].

Колективні ефекти в активних середовищах детально розглянуті Мартіном-Гомезом і співавторами [36*] та в оглядах Марчетті та ін. [37*].

Знання, здобуті в ході таких досліджень, можуть сприяти прогресу в екології, біотехнологіях, медицині, геології та матеріалознавстві. Зокрема, розуміння процесів перемішування в біоконвективних системах має важливе значення для оптимізації біореакторів [38*], а вивчення транспортних процесів в активних середовищах може привести до створення нових типів мікрорідинних пристроїв [39*].

Окремої уваги заслуговують дослідження впливу зовнішніх полів на процеси структуроутворення. Ефекти магнітного поля на конвективні процеси в електропровідних рідинах систематично вивчені в роботах Чандрасекара [40*] та Хьюза і Проктора [41*]. Вплив електричного поля на конвекцію в діелектричних рідинах розглянуто в монографії Мелчера [42*] та в роботах Тернбулла і Мелчера [43*]. Модуляційні ефекти, пов'язані з періодичною зміною зовнішніх параметрів, детально досліджені Девісом [44*] та Бхадаурія [45*]. Показано, що такі впливи можуть як стабілізувати, так і дестабілізувати основний стан системи, приводячи до утворення нових типів структур. Сучасні експериментальні методи дослідження конвективних структур, включаючи техніки візуалізації потоків та вимірювання температурних полів, детально описані в роботах Кошмейдера [46*] та Екхауса [47*]. Ці методи дозволяють проводити детальні порівняння з теоретичними передбаченнями та виявляти нові фізичні ефекти.

Таким чином, незважаючи на значну увагу до проблеми структуроутворення, вичерпна класифікація та опис нелінійних режимів у середовищах із різною фізичною природою залишаються відкритими питаннями. Отже, **актуальність дисертаційної роботи** обумовлена потребою проведенню досліджень взаємозв'язку між зовнішніми полями (магнітними, гравітаційними, температурними градієнтами) та формуванням просторово-часових структур. У цьому контексті науково обґрунтованим є проведення системного аналізу умов виникнення нелінійних структур у різнорідних гідродинамічних середовищах, а також вивчення їх еволюції, стійкості та чутливості до зовнішніх впливів. Такий підхід дозволить не лише поглибити фундаментальне розуміння процесів самоорганізації в складних системах, але й створити теоретичну основу для розробки нових технологічних рішень у галузях енергетики, матеріалознавства, біотехнологій та екології.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі конденсованого стану речовини Інституту монокристалів Національної академії наук України та є складовою частиною таких наукових проєктів:

1) «Визначення фундаментальних закономірностей поведінки дефектних структур у мезо- та наносистемах і встановлення електромагнітних властивостей двовимірних кристалів, гетероструктур та метаматеріалів на їх основі» (шифр «НАНОДЕФЕКТ», номер держреєстрації 0116U001182, термін виконання 2016-2018 рр.);

2) «Оптичні властивості кристалічних наноструктурних, дефектних матеріалів» (шифр «НАНОКЛАСТЕР», номер держреєстрації 0119U100673, термін виконання 2019-2021 рр.);

3) «Дослідження фундаментальних властивостей наноструктурованих систем та середовищ» (шифр «НАНОСТРУКТУРА», номер держреєстрації 0122U001499, термін виконання 2022-2024 рр.).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка теорій та виявлення закономірностей генерації нелінійних структур у гідродинамічних середовищах різної природи під впливом зовнішніх полів, а також дослідження механізмів їх формування, стабілізації та динамічної еволюції. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Визначити механізми генерації великомасштабних вихрових структур у середовищах різної природи, що обертаються, під впливом зовнішньої дрібномасштабної сили. Встановити умови виникнення великомасштабних нестійкостей та локалізованих вихрових структур у таких середовищах:

- а) однорідних рідинах або газах;
- б) температурно-стратифікованій рідині або газі;
- в) газоподібному середовищі з наявністю водяної пари (вологій атмосфері);
- г) рідинах із концентрацією наночастинок.

2. Розробити теорію нелінійного магніто-вихрового динамо, тобто самоузгоджені нелінійні теорії генерації вихрових і магнітних структур:

- а) в електропровідних середовищах, що обертаються;
- б) в електропровідному середовищі з температурним градієнтом;
- в) в електропровідному середовищі, яке похило обертається, з температурним градієнтом у зовнішньому постійному магнітному полі;
- г) в температурно-стратифікованій замагніченій плазмі з урахуванням термомагнітних ефектів.

3. Розробити теорію слабонелінійної конвекції в електропровідній рідині, що неоднорідно обертається під дією зовнішнього аксіального та спірального магнітного поля, а також провести комп'ютерне моделювання хаотичної динаміки магнітних полів у такій рідині.

4. Розвинути слабонелінійну теорію конвективної нестійкості в електропровідній рідині, що неоднорідно обертається, з урахуванням модуляції зовнішніх полів.

5. Визначити умови реалізації гідромагнітних нестійкостей у тонких шарах нанорідини, що неоднорідно обертається у спіральному магнітному полі.

6. Виявити вплив зовнішнього спірального магнітного поля на конвективну нестійкість у шарі пористого середовища, що обертається і насичене електропровідною нанорідиною, що містить металеві, металооксидні, напівпровідникові наночастинок.

7. Виявити нові типи термомагнітних нестійкостей в тонких шарах електропровідної рідини, що неоднорідно обертається.

8. Розробити теорію слабонелінійної конвекції в електропровідній рідині, що неоднорідно обертається з урахуванням термомагнітних ефектів.

9. Розробити теорію процесів структуроутворення внаслідок спонтанної генерації магнітних полів у стратифікованій плазмі.

10. Отримати умови реалізації термомагнітних нестійкостей у повністю іонізованій плазмі у зовнішньому постійному магнітному полі.

11. Розробити теорію процесів біо-термальної нестійкості в пористому шарі, що обертається та насиченому ньютонівською рідиною.

12. Дослідити вплив зовнішнього магнітного поля на процеси біо-термальної конвекції в пористому середовищі, насиченому нанорідиною та з наявністю гіротактичних мікроорганізмів.

13. Побудувати теорію слабонелінійної біо-термальної конвекції в шарі пористого середовища з урахуванням ефектів обертання, скрізного потоку, внутрішнього нагріву та гравітаційної модуляції.

14. Дослідити ефекти термомодуляції на слабонелінійну біо-термальну конвекцію з термотактичними мікроорганізмами в шарі рідини.

Об'єктом дослідження є процеси самоорганізації в гідродинамічних середовищах під впливом зовнішніх полів.

Предметом дослідження є процеси формування нелінійних когерентних структур, що виникають унаслідок гідродинамічної нестійкості в різних типах середовищ із мікро- та наноструктурованими властивостями, зокрема в нанорідинах, рідинах у пористих середовищах, активних середовищах з мікроорганізмами, а також у плазмі.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених наукових завдань було використано аналітичні методи, зокрема метод багатомасштабних асимптотичних розкладів, методи теорії збурень, математичної фізики, теорію детермінованого хаосу, якісний аналіз динамічної поведінки диференційних систем рівнянь. Крім того, застосовувалося чисельне моделювання із використанням сучасного математичного і фізичного програмного забезпечення, зокрема: Maple, Mathematica, Matlab-Simulink, LabVIEW, Multisim, Proteus.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертації встановлено механізми формування нових класів нелінійних структур у різноманітних гідродинамічних середовищах з урахуванням комплексного впливу зовнішніх полів. Вперше запропоновано строгий теоретичний підхід до опису процесів структуроутворення в турбулентних середовищах різної фізичної природи, який базується на методі багатомасштабних асимптотичних розкладів. Вперше проблему теплової конвекції розглянуто з урахуванням впливу важливих факторів неоднорідного обертання середовища та спірального магнітного поля. Вплив цих полів на процеси структуроутворення в середовищах з пасивною (наночастинки) та активною матерією (саморухливі мікроорганізми) раніше в літературі не розглядалося. Основні результати, що мають наукову новизну, формулюються у вигляді таких положень:

1. Вперше аналітично отримано критерії для виникнення нелінійного гідродинамічного та магнітогідродинамічного α -ефектів у рамках розробленої в дисертації самоузгодженої теорії нелінійного динамо.

2. Чисельним методом знайдено нові типи локалізованих великомасштабних вихрових та магнітних структур у вигляді нелінійних хвиль і спіральних кінків, які виникають у середовищі під дією зовнішньої дрібномасштабної сили.

3. Вперше аналітично отримано критерії для критичних чисел Релея в задачі магнітної конвекції електропровідної рідини, що неоднорідно обертається у постійному вертикальному (аксіальному) та спіральному магнітному полі з нетривіальною топологією. Показано, що поріг виникнення магнітної конвекції в аксіальному полі залежить від профілю обертання (числа Россбі Ro); у спіральному полі - від профілю азимутального магнітного поля (магнітного числа Россбі Rb).

4. Встановлено, що при $Ro > 0$ обертання стабілізує конвекцію, а при $Ro < 0$ - дестабілізує її. Зворотна ситуація спостерігається для спіральної магнітної конвекції: при $Rb > 0$ - дестабілізація, при $Rb < 0$ - стабілізація.

5. Вперше встановлено, що наявність наночастинок у середовищі знижує граничне значення стаціонарного критичного числа Релея Ra_{min} як в аксіальній, так і в спіральній магнітоконвекції, що вказує на суттєвий вплив дисперсної фази на процеси втрати стійкості.

6. Розроблено слабонелінійну теорію аксіальної та спіральної магнітної конвекції в електропровідному середовищі, що неоднорідно обертається, яка описується новими $6D$ та $8D$ динамічними системами типу Лоренца. Чисельним аналізом виявлено режими регулярної та хаотичної поведінки, зокрема встановлено умови виникнення інверсій збурених (хаотичних) магнітних полів. Розроблено електронні схеми генераторів хаотичних коливань на основі нових 6 -мірних ($6D$) та 8 -мірних ($8D$) динамічних систем типу Лоренца, які були апробовані в середовищі Multisim та експериментально реалізовані на мікроконтролері Arduino.

7. Розроблено теорію магнітної конвекції в електропровідному середовищі, що неоднорідно обертається з урахуванням термомагнітних ефектів, у межах якої отримано $6D$ динамічну систему рівнянь, що описує механізм генерації магнітного поля. Зазначена система є альтернативною до моделі Рікітаке, що використовується в теорії геомагнетизму. З неї виведено нелінійне рівняння типу Гінзбурга-Ландау, розв'язки якого демонструють вихід на стаціонарний рівень магнітного поля за рахунок конвективного механізму генерації. Чисельний аналіз показав, що ефекти неоднорідності коефіцієнта питомої термо-е.р.с. і Ледюка-Рігі істотно впливає на генерацію магнітного поля, змінюючи характер перехідних процесів і умови виникнення хаосу. Крім того, встановлено наявність хаотичних режимів у $6D$ моделі термомагнітного динамо, на основі якої розроблено та протестовано електронну схему генератора хаотичних коливань, успішно реалізовано на мікроконтролері Arduino.

8. Вперше отримано аналітичні вирази для інкрементів термомагнітної нестійкості (ТМ-нестійкості) у повністю іонізованій плазмі, що перебуває у

зовнішньому магнітному полі, з урахуванням плавних градієнтів густини та температури. Визначено, що за відсутності зовнішнього магнітного поля така нестійкість є неефективною, оскільки магнітотеплові збурення згасають. Натомість у замагніченій плазмі виявлено область параметрів, у якій розвивається ТМ-нестійкість.

9. У рамках розробленої теорії слабонелінійної біо-термальної конвекції встановлено, що процеси тепло- та масопереносу в середовищах з активною матерією можуть ефективно керуватися шляхом гравітаційної модуляції (для рідин із гіротактичними мікроорганізмами) та теплової модуляції (для рідин із термотактичними мікроорганізмами). Встановлено, що гіротактичні мікроорганізми сферичної форми істотно посилюють розвиток біотермальної конвекції за наявності модуляції гравітаційного поля.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані в дисертаційній роботі результати мають широкі перспективи практичного застосування в різних галузях науки та техніки. Зокрема, вони можуть бути використані для:

1. Пояснення походження великомасштабних вихрових структур у природних гідродинамічних середовищах, таких як тайфуни, спіральні солітоноподібні структури в фотосфері Сонця, а також спіральні структури галактик.

2. Інтерпретації явища спонтанної генерації магнітних полів у масивних зорях та у тонкій оболонці нейтронних зір, де спостерігаються високі температури.

3. Аналізу формування конвективних структур у гарячих акреційних дисках, що супроводжують компактні астрофізичні об'єкти (нейтронні зорі, чорні діри).

4. Моделювання процесів генерації магнітних полів в електропровідних середовищах та плазмі на основі нових багатовимірних (6D та 8D) динамічних систем типу Лоренца, з урахуванням впливу обертання, градієнтів температури та зовнішніх полів.

5. Розробки компактних пристроїв генерації хаотичних сигналів, які можуть бути застосовані в системах захищеного зв'язку, генерації випадкових чисел, а також у навчальних цілях для демонстрації властивостей нелінійної динаміки.

6. Оптимізації теплообміну в нанорідинних середовищах, що може бути використано при проектуванні ефективних теплообмінників, систем транспортування і виробництва теплової енергії, а також у сучасних біомедичних технологіях зокрема для діагностики та лікування онкологічних захворювань із використанням локального нагріву наночастинками.

7. Контролю самоструктуризації у біологічних середовищах, включаючи біореактори, системи очищення води, моделі росту колоній бактерій і клітинних культур.

8. Розробки автономних мікроскопічних саморухомих пристроїв, які можуть використовуватися для адресної доставки ліків, хіміотерапії, внутрішньої діагностики, а також моніторингу навколишнього середовища на мікро- та нанорівнях.

Особистий внесок здобувача. Здобувач зробив вагомий внесок на всіх етапах виконання дослідження. В роботах [1]-[2], [4]-[13] де дисертант є першим автором,

ним самостійно або у співпраці було сформульовано постановку задач, виконано аналітичні та чисельні обчислення, проведено аналіз отриманих результатів, здійснено написання та підготовку статей до публікації, а також підготовлено відповіді на зауваження рецензентів. В роботах [3], [14], [21] здобувачу належать постановка задачі, проведення чисельного моделювання, написання та оформлення статей для публікації. В роботах [15]-[20], [22]-[31] автору належать формулювання наукових задач, аналітичне та чисельне опрацювання, аналіз результатів, написання текстів статей, їх підготовка до публікації, а також підготовка відповідей на зауваження рецензентів. Тези доповідей [32]-[36], [38] виконані здобувачем самостійно; [37], [39] у співпраці.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на наукових семінарах Інституту монокристалів Національної академії наук України, а також на низці вітчизняних і міжнародних наукових конференцій, зокрема:

- XIII International Conference «PLASMA ELECTRONICS AND NEW METHODS OF ACCELERATION» (Kharkiv, Ukraine, 24-28 August, 2015);
- XIV International Conference «PLASMA ELECTRONICS AND NEW ACCELERATION METHODS» (Kharkiv, Ukraine, 27-31 August, 2018);
- VII International Conference «Modern Problems of Physics» (Dushanbe, 9-10 October, 2020);
- XXXII Міжнародна науково-практична конференція ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: НАУКА, ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ОСВІТА, ЗДОРОВ'Я. MicroCAD-2024 (Kharkiv, Ukraine, 22-25 May, 2024) - 2 доповіді;
- 83rd International Scientific Conference of the University of Latvia «Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations» (Riga, Latvia, 29 January, 2025).
- XXXIII Міжнародна науково-практична конференція ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: НАУКА, ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ОСВІТА, ЗДОРОВ'Я. MicroCAD-2025 (Kharkiv, Ukraine, 14-17 May, 2025).
- X International Scientific-Practical Conference Physical and Technological Problems of Transmission, Processing and Storage of Information in Infocommunication Systems (Chernivtsi, Ukraine, 15-17 May, 2025).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 30 статтях у міжнародних та вітчизняних наукових виданнях, 8 тезах доповідей на наукових конференціях, а також в одному розділі збірника наукових праць. Серед опублікованих робіт: 3 статті надруковано в наукових журналах першого квартилю (Q1), 5 — у журналах другого квартилю (Q2), 9 — у виданнях третього квартилю (Q3) та 12 — у виданнях четвертого квартилю (Q4) відповідно до класифікації SJR (SCImago Journal Rank). Усього за матеріалами дисертації опубліковано 39 наукових праць.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг роботи становить 462 сторінки, з яких основна частина викладена на 388 сторінках.

Дисертація містить 143 рисунка, з яких 2 на 1 сторінці, 8 таблиць і список використаних джерел, що налічує 290 найменувань на 30 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, представлено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, темами та проектами. Сформульовано мету й завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет, окреслено застосовані методи дослідження. Розкрито наукову новизну отриманих результатів, їхнє практичне значення, обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Надано перелік основних публікацій, у яких висвітлено зміст дисертації, наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дослідження, а також подано структуру та обсяг дисертаційної роботи. Кожен розділ дисертації передуює оглядовий аналіз наукових джерел з відповідної тематики.

Перший розділ «Вихрове динамо у середовищах, що обертаються» присвячено теоретичному аналізу процесів генерації та нелінійної еволюції великомасштабних вихрових структур у середовищах, що обертаються, під впливом дрібномасштабної зовнішньої сили \vec{F}_0 . Така сила збуджує осциляції швидкості \vec{v}_0 з малим числом Рейнольдса $R = v_0 t_0 / \lambda_0 \ll 1$, де λ_0 - характерний просторовий масштаб, t_0 - характерний часовий масштаб. Наявність малого параметра ($R \ll 1$) у безрозмірному записі рівнянь руху (рівнянь Нав'є-Стокса) дає підстави для застосування багатомасштабної асимптотичної методології [13*].

На відміну від класичної теорії середнього поля [10*]-[12*], запропонований підхід дає змогу здійснювати послідовний аналіз еволюції збурень на різних просторово-часових масштабах у кожному порядку розкладу за малим параметром R . У нульовому порядку дрібномасштабні високочастотні коливання швидкості \vec{v}_0 збуджуються зовнішньою силою \vec{F}_0 . Динаміка дрібномасштабних коливань зазнає істотного впливу зовнішніх чинників: обертання, стратифікації середовища, магнітних і гравітаційних полів тощо. Середні значення таких коливань дорівнюють нулю, проте вищі порядки розкладу внаслідок нелінійних ефектів породжують доданки, які після усереднення не зникають та стають джерелом великомасштабних полів. Методика побудови умов розв'язності для багатомасштабного асимптотичного розкладу, які визначають рівняння еволюції великомасштабних збурень, докладно викладена в працях автора [1]-[2], [10]-[12], [22], [32]. У підрозділах 1.1 і 1.2 сформульовано замкнуті рівняння нелінійного вихрового динамо в однорідній в'язкій рідині, що обертається, за наявності дрібномасштабної зовнішньої сили $\vec{F}_0 = f_0 (\vec{i} \cos \varphi_2 + \vec{j} \cos \varphi_1)$ як спірального (1), так і неспірального (2) характеру:

$$\vec{F}_0 \text{rot} \vec{F}_0 \neq 0, \text{div} \vec{F}_0 = 0, \text{rot} \vec{F}_0 \neq 0, \vec{F}_0 = f_0 \vec{F}_0 \left(\frac{x}{\lambda_0}; \frac{t}{t_0} \right), \quad (1)$$

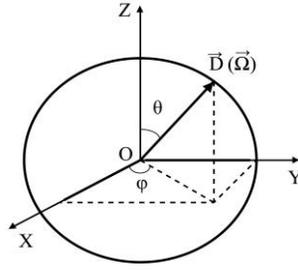


Рисунок 1. Показано зв'язок між декартовими проекціями параметра обертання \vec{D} (або вектора кутової швидкості обертання $\vec{\Omega}$) та їх проекціями у сферичній системі координат.

де f_0 - амплітуда зовнішньої сили, $\varphi_1 = \vec{\kappa}_1 \vec{x} - \omega_0 t$, $\varphi_2 = \vec{\kappa}_2 \vec{x} - \omega_0 t$, $\vec{\kappa}_1 = \kappa_0(1,0,1)$, $\vec{\kappa}_2 = \kappa_0(0,1,1)$. Зовнішня неспіральна сила має такі властивості:

$$\vec{F}_0 \text{rot} \vec{F}_0 = 0, \text{div} \vec{F}_0 = 0, \text{rot} \vec{F}_0 \neq 0, \vec{F}_0 = f_0 \vec{F}_0 \left(\frac{x}{\lambda_0}; \frac{t}{t_0} \right), \quad (2)$$

тут $\vec{\kappa}_1 = \kappa_0(1,0,0)$, $\vec{\kappa}_2 = \kappa_0(0,1,0)$. Встановлено, що на лінійній стадії еволюції великомасштабних збурень реалізується нестійкість типу α -ефекту, яка виникає під впливом сили Коріоліса та зовнішньої сили. У випадку неспіральної сили необхідною умовою для розвитку нестійкості є нахил осі обертання відносно вертикалі (див. Рис. 1), що обмежує можливість генерації збурень у полярних широтах і вказує на переважну ймовірність формування вихрових структур в екваторіальній зоні. Отримано нові стаціонарні розв'язки у вигляді локалізованих вихрових конфігурацій: спіральних кінків, нелінійних хвиль Бельтрамі та кінків зі швидкісним профілем типу перегину (див. Рис. 2).

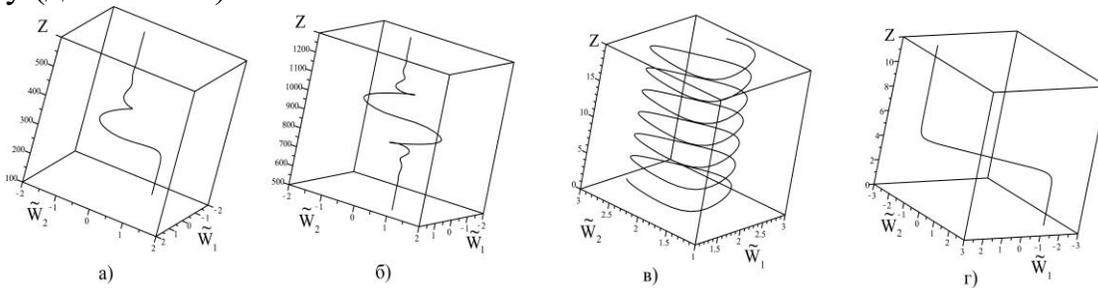


Рисунок 2. а) зображено спіральний кінк, що зв'язує гіперболічну точку зі стійким фокусом; б) зображено спіральний кінк, що зв'язує нестійкий та стійкий фокус; в) нелінійна спіральна хвиля; г) локалізована нелінійна вихрова структура (кінк) з профілем швидкості у вигляді перегину.

У підрозділах 1.3-1.5 побудовано замкнуті рівняння нелінійного вихрового динамо для стратифікованої (сухої та вологої) атмосфери, що обертається. Виявлено режими лінійної генерації великомасштабних вихрових збурень і встановлено параметричні області нестійкості, що визначаються величинами обертання D та стратифікації R . Врахування ефектів стратифікації у вологої атмосфери, зумовленої температурним нагріванням і тепловиділенням унаслідок конденсації, істотно підсилює інтенсивність

генерації великомасштабних збурень. Чисельні розрахунки дозволили отримати стаціонарні рішення у вигляді локалізованих вихрових структур, подібних до аналогічних рішень для однорідної рідини, що обертається. У підрозділі 1.6 побудовано теорію параметричної генерації великомасштабних вихрових структур (ВВС) у стратифікованій нанорідині, що обертається похило. Встановлено, що нестійкість типу α -ефекту, яка зумовлює генерацію ВВС, виникає лише за умови нахилу вектора кутової швидкості обертання відносно вертикальної осі OZ. Виявлено новий механізм генерації ВВС без наявності температурного градієнта, пов'язаний із підвищенням концентрації наночастинок. Продемонстровано, що зі зростанням частоти ω_0 та хвильового числа k_0 зовнішнього параметричного впливу ефективність генерації зменшується (див. Рис. 3), що відкриває можливості активного керування процесами формування ВВС. У нелінійному режимі встановлено наявність стаціонарних локалізованих розв'язків у вигляді нелінійних хвиль та кінкових структур (див. Рис. 2 в)-г)).

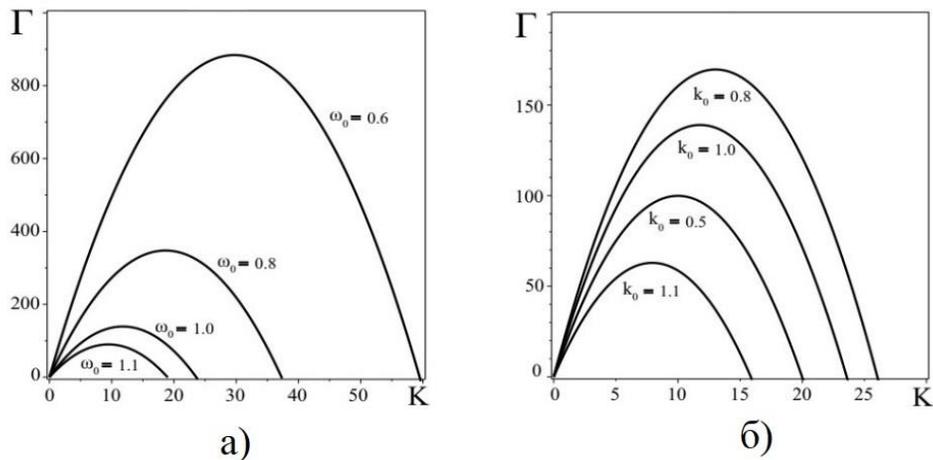


Рисунок 3. а) Графік залежності інкременту нестійкості Γ від хвильових чисел K для різних частот ω_0 і $k_0 = 1$, б) графік залежності інкременту нестійкості Γ від хвильових чисел K для різних хвильових чисел k_0 і $\omega_0 = 1$.

Другий розділ «Великомасштабні вихрові і магнітні структури в електропровідних середовищах» присвячено дослідженню механізмів формування великомасштабних вихрових і магнітних збуджень в електропровідних середовищах. У цьому розділі побудовано самозгоджену теорію магніто-вихрового динамо в середовищах, що обертаються, під впливом зовнішньої дрібномасштабної сили. Основні результати викладеного дослідження опубліковані в статтях [3], [4], [6], [29] та у матеріалах конференції [34], [38]. У підрозділі 2.1 показано, що на лінійній стадії генерація вихрових структур зумовлена розвитком нестійкості, яка пов'язана з гідродинамічним (ГД) α -ефектом, а генерація магнітних структур - з магнітогідродинамічним (МГД) α_H -ефектом. Обидва типи нестійкостей виникають під спільним впливом дрібномасштабної

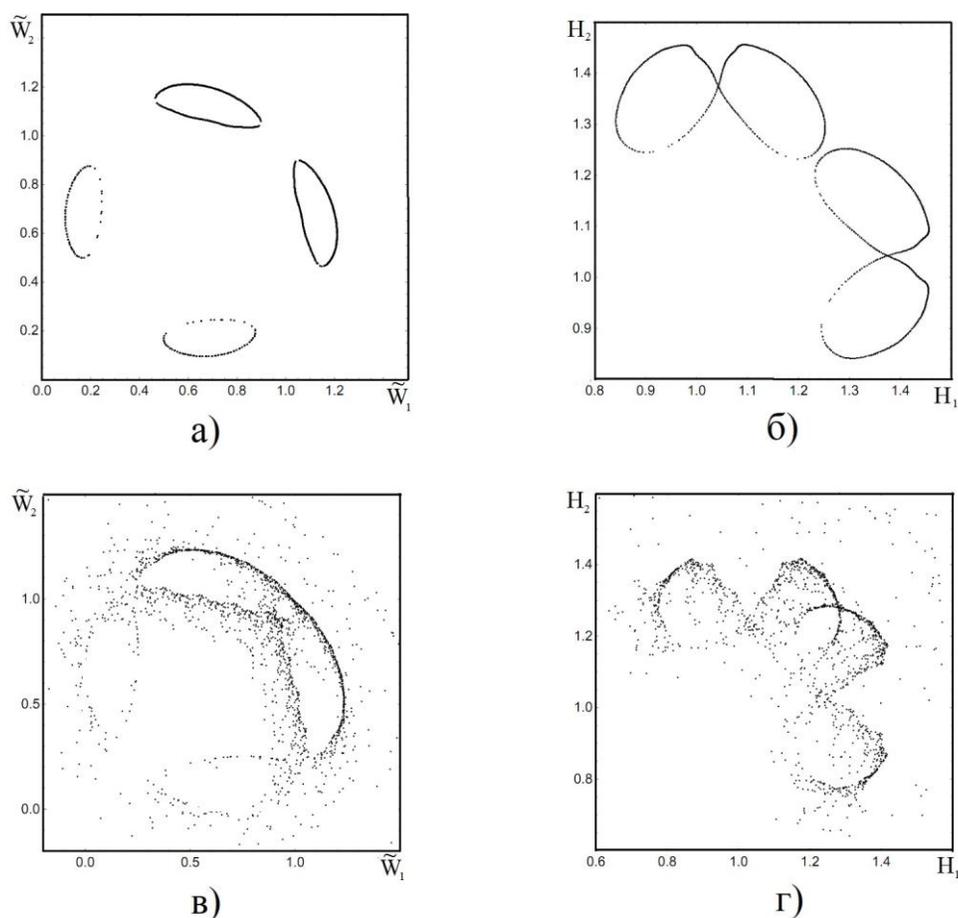


Рисунок 4. Показано перетин Пуанкаре для двох фазових траєкторій. Зверху (а-б)) представлений регулярний тип траєкторій з початковими умовами $W_1(0) = W_2(0) = 1$, $H_1(0) = H_2(0) = 1.2$. Знизу (в-г)) представлений хаотичний тип траєкторій з початковими умовами $W_1(0) = W_2(0) = 1$, $H_1(0) = H_2(0) = 1.149$.

зовнішньої сили та сили Коріоліса. Отримано стаціонарні розв'язки, які описують магнітні структури у формі періодичних нелінійних хвиль і кінків у середовищах, що обертаються та мають скінченну електропровідність. Для випадку дуже низької електропровідності знайдено нелінійні стаціонарні розв'язки, які описують вихрові структури у формі спіральних кінків (див. Рис. 2а)-2б)). У підрозділі 2.2 виведено систему нелінійних рівнянь для опису магнітовихрового динамо в електропровідній рідині, що обертається під кутом, під дією зовнішньої неспіральної сили. Доведено, що генерація великомасштабних вихрових структур (ВВС) і великомасштабного магнітного поля (ВМП) на лінійній стадії є наслідком нестійкості типу α -ефекту, причому необхідною умовою її виникнення є відхилення вектора кутової швидкості обертання Ω від вертикальної осі OZ . Доведено існування великомасштабних регулярних і хаотичних вихрових та магнітних структур у стаціонарному режимі (див. Рис. 4). У підрозділі 2.3 в межах багатомасштабного асимптотичного підходу виведено рівняння еволюції великомасштабних збурень у температурно-стратифікованому електропровідному середовищі з дрібномасштабною спіральністю поля швидкості та

магнітного поля. Доведено, що за відсутності спіральності магнітного поля генерація ВВС і ВМП відбувається незалежно одна від одної, внаслідок розвитку відповідно ГД- та МГД α -ефектів. Проведено якісні оцінки параметрів лінійної нестійкості в умовах, наближених до сонячних, що виявили узгодженість теоретично отриманих масштабів і часів з експериментальними спостереженнями гідродинамічних структур. У підрозділі 2.4 отримано замкнену самозгоджену систему нелінійних рівнянь, яка описує нелінійну стадію зростання ВВС і ВМП у стратифікованому електропровідному середовищі. Доведено можливість існування великомасштабних хаотичних і регулярних вихрових та магнітних структур у вигляді стаціонарних нелінійних хвиль, кінків і солітонів. У підрозділі 2.5 виведено замкнену систему нелінійних рівнянь для великомасштабних вихрових і магнітних збурень у стратифікованому середовищі, що обертається з нахиленою віссю, під дією дрібномасштабної неспіральної зовнішньої сили. Визначено, що за відсутності зовнішнього магнітного поля генерація ВВС і ВМП зумовлена розвитком ГД та МГД α -ефектів. У разі наявності зовнішнього поля темпи зростання вихрових і магнітних збурень збігаються. При цьому слабе зовнішнє поле не пригнічує генерацію великомасштабних структур, тоді як сильне - суттєво її гальмує. Доведено, що в температурно-стратифікованих середовищах великомасштабні нестійкості α -типу можуть виникати навіть при низьких значеннях числа Релея Ra . Доведено існування регулярних і хаотичних великомасштабних стаціонарних вихрових і магнітних структур у стратифікованих середовищах під дією дрібномасштабної неспіральної сили. У підрозділі 2.6, у межах електронної магнітогідродинаміки (ЕМГД) з урахуванням термомагнітних ефектів, виявлено нову великомасштабну нестійкість α -типу, що забезпечує генерацію ВВС і ВМП у температурно-стратифікованій плазмі. Ця нестійкість виникає в плоскому шарі під впливом зовнішнього однорідного магнітного поля, нахиленого відносно шару, у поєднанні з дрібномасштабною неспіральною силою. Встановлено, що збільшення параметра Нернста ξ призводить до зменшення коефіцієнта підсилення α , що, своєю чергою, гальмує розвиток великомасштабної нестійкості (див. Рис. 5).

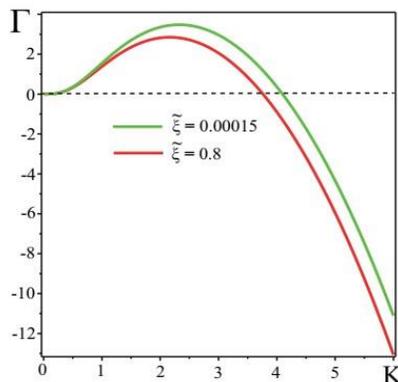


Рисунок 5. Графіки показують залежність інкременту нестійкості Γ від хвильових чисел K для різних параметрів Нернста $\xi = 0.00015$ і $\xi = 0.8$.

Отримано стаціонарні розв'язки рівнянь вихрового та магнітного динамо у вигляді

локалізованих структур типу нелінійних хвиль Бельтрамі (див. Рис. 6).

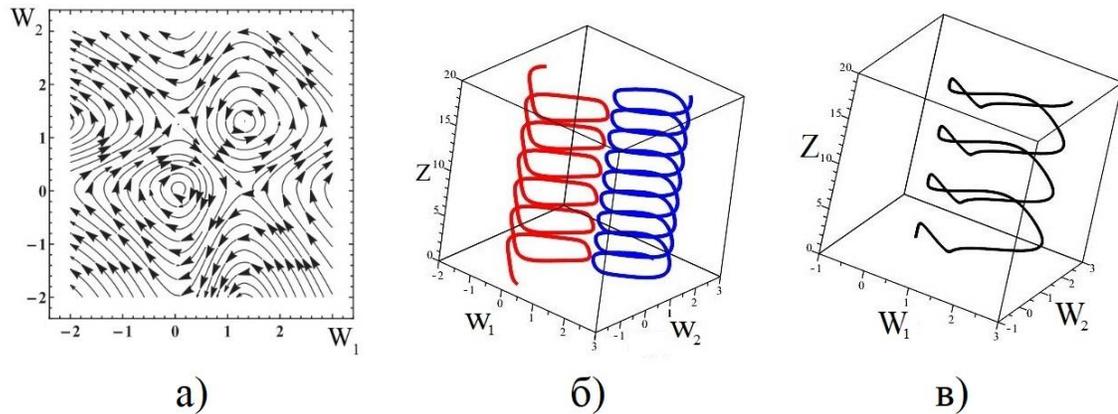


Рисунок 6. а) фазова площина стаціонарних рівнянь динамічної системи; б) стаціонарні рішення у вигляді нелінійних хвиль навколо нерухомих точок; в) приклад спіральної вихрової структури.

У третьому розділі «Теплова конвекція в електропровідних середовищах, що неоднорідно обертаються, в аксіальному магнітному полі» побудовано теорію магнітної конвекції в шарі електропровідної рідини, що неоднорідно обертається. Основні результати дослідження, виконаного автором, опубліковані у наукових статтях [5], [7], [14], [15], [23], [31] та у матеріалах конференції [33], [37], [39]. У підрозділі 3.1 розроблено лінійну теорію конвективної нестійкості тонкого шару електропровідної рідини, що неоднорідно обертається, в однорідному вертикальному магнітному полі для осесиметричних збурень. Отримано критерії стійкості плазмових течій, згідно з якими стабілізацію забезпечують: однорідне магнітне поле, неоднорідне обертання з дійсною епіциклічною частотою $\kappa^2 = 4\Omega^2(1 + Ro) > 0$, а також вертикально зростаючий температурний градієнт $dT_0/dz > 0$.

У підрозділі 3.2, для опису стаціонарної конвекції розроблено слабонелінійну теорію, що базується на рівнянні Гінзбурга-Ландау. Розв'язання цього рівняння демонструють підвищення інтенсивності теплоперенесення при збільшенні параметрів обертання в позитивному напрямку. Показано, що для профілів обертання з від'ємними значеннями числа Россбі $Ro < 0$ критичні значення числа Релея для стаціонарної та коливальної конвективної нестійкості зменшуються. Побудовано слабонелінійну теорію стаціонарної конвекції в шарі електропровідної рідини, що неоднорідно обертається, в однорідному вертикальному магнітному полі. Виявлено, що за час встановлення стаціонарного рівня теплопередачі інтенсивність теплоперенесення збільшується для профілів обертання середовища з позитивними числами Россбі $Ro > 0$. У підрозділі 3.3 для опису слабонелінійної магнітної конвекції в середовищі, що неоднорідно обертається, отримана нова динамічна система нелінійних рівнянь в 6-мірному фазовому просторі:

$$\begin{cases} \dot{X} = -X + RY - TV - HU \\ \dot{V} = -V + HW + \sqrt{Ta}(1 + Ro)X \\ \dot{U} = -Pm^{-1}U + Pr^{-1}X \\ \dot{W} = -Pm^{-1}W - Pr^{-1}V + Ro\sqrt{Ta}U \\ \dot{Y} = Pr^{-1}(-Y + X - XZ) \\ \dot{Z} = Pr^{-1}(-bZ + XY) \end{cases} \quad (3)$$

У рівняннях (3) точка зверху означає диференціювання за часом. Змінні X, V, U, W, Y, Z позначають амплітуди збурень полів швидкості, магнітного поля та температури; H, Ta, T, Pm, Pr, Ro, b - дійсні постійні, а R (число Релея) - біфуркаційний параметр. Чисельні дослідження (3) виявили хаотичну поведінку магнітного поля та ефекти його інверсій. Для фіксованих значень параметрів 6-вимірної (6D) динамічної системи обчислено спектр показників Ляпунова та дробову розмірність Каплана-Йорка. Наявність додатного показника Ляпунова свідчить про хаотичний характер динаміки системи, а дробова розмірність Каплана-Йорка підтверджує фрактальну природу дивного атратора. На основі отриманих результатів побудовано моделі системи в середовищах Matlab-Simulink та LabVIEW, а також реалізовано електронний генератор хаотичних сигналів у Multisim. Результати моделювання у середовищі Multisim підтверджують хаотичну динаміку, узгоджену з результатами, отриманими в середовищах Matlab-Simulink та LabVIEW. У підрозділі 3.4 встановлено, що в магнітній конвекції, що неоднорідно обертається, домінуючу роль в теплопереносі грає модуляція обертання (див. Рис. 7). Показано, що модуляція сили тяжіння має більший вплив на теплоперенос, ніж модуляція магнітного поля, тоді як модуляція температури дає найменший ефект.

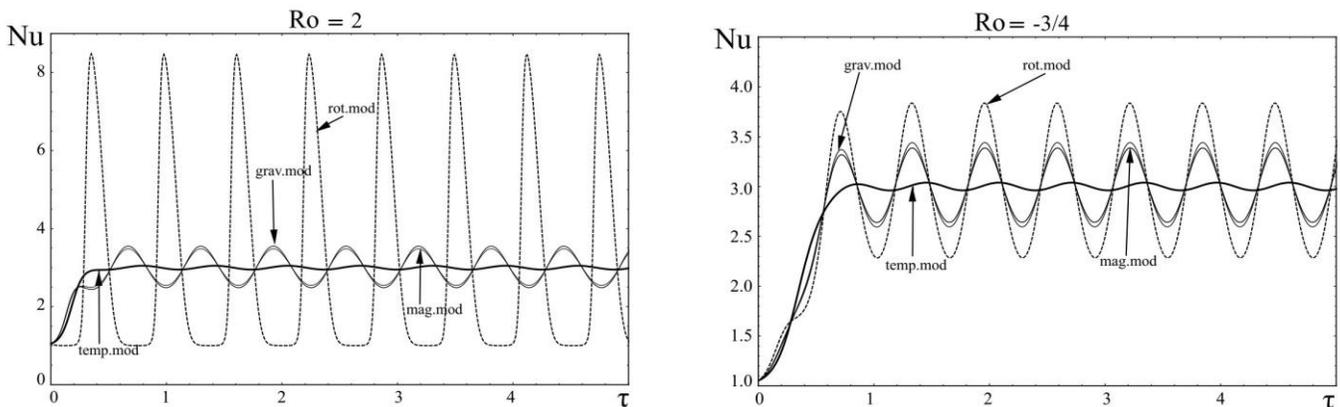


Рисунок 7. Залежність числа Нуссельта Nu від τ до різних типів модуляції при позитивних $Ro = 2$ і негативних $Ro = -3/4$ числах Россби.

Досліджено вплив гравітаційної модуляції на слабонелінійну магнітоконвекцію в шарі

нанорідини, що неоднорідно обертається. Результати свідчать, що гравітаційна модуляція, неоднорідне обертання та різниця у концентрації наночастинок на межах шару можуть бути ефективними механізмами керування тепло- та масопереносом. Встановлено, що від'ємний профіль обертання дестабілізує систему, а модуляція підсилює перенос тепла та маси порівняно з немодульованим випадком. У підрозділі 3.5 досліджено комбінований вплив струму Холла та аксіального магнітного поля на конвекцію в неоднорідно обертовому шарі електропровідної нанорідини з урахуванням броунівської дифузії та термофорезу. За відсутності температурного градієнта виявлено нові типи магнітообертової нестійкості в аксіальному магнітному полі в тонкому шарі нанорідини. У присутності градієнтів температури та концентрації наночастинок досліджено стаціонарний режим магнітоконвекції. Показано, що збільшення числа Льюїса, модифікованого коефіцієнта дифузії та концентраційного числа Релея сприяє швидшому виникненню конвекції. Вплив струму Холла може мати як стабілізуючу, так і дестабілізуючу дію залежно від параметрів. Профілі обертання з $Ro < 0$ знижують поріг теплової нестійкості та сприяють ініціюванню конвекції. Визначено умови стабілізації та дестабілізації стаціонарної конвекції в аксіальному магнітному полі.

Четвертий розділ «Теплова конвекція в електропровідних середовищах, що обертаються, в спіральному магнітному полі» присвячений побудові теорії магнітогідродинамічної конвекції в електропровідних середовищах з урахуванням обертання та просторово-неоднорідного (спірального) зовнішнього магнітного поля. Ключові наукові результати цього розділу отримані дисертантом в наступних публікаціях [8], [16], [21]. У підрозділі 4.1 встановлено, що пороги стаціонарної та коливальної нестійкості для конвекції в спіральному магнітному полі є нижчими порівняно з аналогічними порогами при дії постійного аксіального магнітного поля за будь-яких профілів неоднорідного обертання середовища (характеризованих числами Россбі Ro). Це свідчить про посилення нестійкості під впливом спірального компонента магнітного поля. У підрозділі 4.2 отримано нову 8D динамічну систему нелінійних рівнянь, яка описує слабонелінійну стадію магнітної конвекції в середовищі, що неоднорідно обертається у зовнішньому спіральному магнітному полі:

$$\begin{cases} \dot{X} = -X + RY - TV - HU + \tilde{H}\tilde{W} \\ \dot{V} = -V + HW + \sqrt{Ta}(1 + Ro)X \\ \dot{\tilde{V}} = -\tilde{V} + \tilde{\xi}H(1 + Rb)U - H\tilde{W} \\ \dot{U} = -Pm^{-1}U + Pr^{-1}X \\ \dot{W} = -Pm^{-1}W - Pr^{-1}V + Ro\sqrt{Ta}U \\ \dot{\tilde{W}} = -Pm^{-1}\tilde{W} + Pr^{-1}\tilde{V} + \tilde{\xi}Pr^{-1}RbX \\ \dot{Y} = Pr^{-1}(-Y + X - XZ) \\ \dot{Z} = Pr^{-1}(-bZ + XY) \end{cases} \quad (4)$$

Тут змінні $X, U, V, \tilde{V}, W, \tilde{W}, Y, Z$ позначають амплітуди збурень полів швидкості, магнітного поля та температури. $\tilde{\xi}$ - відношення азимутального магнітного поля до аксіального, Rb - характеризує неоднорідне азимутальне магнітне поле. Чисельне моделювання (4) виявило складну динаміку з утворенням дивного атрактора. Для фіксованих параметрів обчислено спектр показників Ляпунова та розмірність Каплана-Йорка. Наявність додатного показника Ляпунова підтверджує хаотичний характер динаміки, а дробова розмірність атрактора вказує на його фрактальну структуру. На основі чисельного аналізу побудовано моделі в

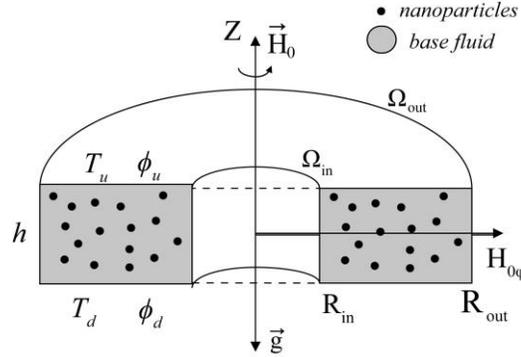


Рисунок 8. Електропровідна нанорідина заповнює шар між двома обертовими циліндрами, що мають кутові швидкості Ω_{in} і Ω_{out} відповідно, та перебуває в спіральному магнітному полі.

середовищах Matlab-Simulink і LabVIEW, а також реалізовано схему генератора хаотичних сигналів у Multisim. Порівняння результатів моделювання у різних середовищах демонструє їхню узгодженість і підтверджує адекватність моделі. У підрозділі 4.3 розглянуто магнітну конвекцію в шарі електропровідної нанорідини, що нерівномірно обертається в спіральному магнітному полі (див. Рис. 8). Навіть за відсутності температурного градієнта, але за наявності градієнта концентрації наночастинок, виявлено різні типи магнітообертальної нестійкості. Зокрема, при наявності лише аксіального магнітного поля ($H_{0z} \neq 0$) виникає стандартна магнітообертальна нестійкість. Якщо діє тільки неоднорідне азимутальне магнітне поле ($H_{0\phi}(R) \neq 0$), збуджується азимутальна магнітообертальна нестійкість. У разі одночасної дії аксіального та азимутального компонентів магнітного поля, тобто при спіральній конфігурації $\vec{H}_0 = H_{0\phi}(R)\vec{e}_\phi + H_{0z}\vec{e}_z$, виникає спіральна магнітообертальна нестійкість. Для кожного типу отримано дисперсійні співвідношення у площині хвильового числа і числа Россбі для різних значень числа Тейлора Ta та азимутального магнітного параметра Чандрасекара Q_ϕ . Визначено критичні значення параметрів обертання і магнітного поля, а саме числа Россбі Ro_{cr} і магнітні числа Россбі Rb_{cr} . Показано, що області нестійкості в нанорідинах є значно ширшими порівняно з однорідними рідинами. Для аксіальної та спіральної конфігурацій отримано явні вирази для критичного числа Релея Ra_{st} і побудовано криві нейтральної

стійкості. Встановлено, що присутність наночастинок знижує порогові значення Ra_{st} , що вказує на дестабілізуючий вплив дисперсної фази. У підрозділі 4.4 досліджено теплову конвекцію в шарі пористого середовища типу Дарсі-Брінкмана, насиченого електропровідною нанорідиною, у спіральному магнітному полі. За відсутності температурного градієнта виявлено новий тип нестійкості, зумовлений впливом неоднорідного азимутального магнітного поля. Визначено темпи зростання збурень і область нестійкості залежно від магнітного числа Россбі Rb та хвильового числа k . За наявності температурного градієнта досліджено стаціонарний режим магнітоконвекції з урахуванням нерівномірного обертання. Показано, що аксіальна складова спірального магнітного поля та обертання мають стабілізуючий вплив, тоді як азимутальна складова посилює нестійкість при додатних значеннях Rb . Визначено умови реалізації стабілізації або дестабілізації теплової конвекції для нанорідин з різними типами наночастинок, зокрема металевими, металооксидними та напівпровідниковими.

П'ятий розділ «Процеси структуроутворення в неоднорідних середовищах з урахуванням термомагнітних явищ» присвячено дослідженню процесів формування структур в неоднорідних середовищах з урахуванням термомагнітних (ТМ) ефектів. Результати дослідження, проведеного здобувачем, знайшли відображення у таких статтях [9], [13], [17], [20], [30] та у матеріалах конференції [35], [36]. У підрозділі 5.1 отримано дисперсійне рівняння для малих ТМ-збурень в електропровідній рідині, що неоднорідно обертається у зовнішньому аксіальному магнітному полі $B_0 \parallel OZ$. У разі відсутності зовнішнього магнітного поля $B_0 = 0$ встановлено критерії стійкості ТМ-збурень у слабо неоднорідному безмежному середовищі залежно від профілю обертання, що характеризується числом Россбі Ro . У наближенні слабких градієнтів температури ∇T_0 та питомої термо-е.р.с. $\nabla \alpha_0$ встановлено, що для низькопровідного середовища, в якому магнітне число Прандтля $Pm = \eta / \chi \gg 1$, генерація магнітного поля є неефективною через втрати, зумовлені теплопровідністю та в'язкістю рідини. Для високопровідної рідини з $Pm = \eta / \chi \ll 1$ генерація магнітного поля є ефективною за умови домінування ефекту Ледюка-Ріги над теплопереносом. Визначено, що для збурень в аксіальному напрямку з хвильовим вектором $\vec{k} = \vec{e}_z k_z$ ефект Холла може чинити як стабілізуючий, так і дестабілізуючий вплив залежно від характеру обертання. Для радіальних збурень з $\vec{k} = \vec{e}_R k_R$ встановлено, що ефекти Нернста у зовнішньому магнітному полі \vec{B}_0 , Ледюка-Ріги, градієнти рівноважної температури та питомої термо-е.р.с. ω_{TM} , а також архімедова сила сприяють дестабілізації осесиметричних збурень, що призводить до генерації магнітного поля. У підрозділі 5.2 доведено, що присутність ТМ-ефектів знижує поріг розвитку нестійкості незалежно від типу профілю обертання, тобто чинить дестабілізуючий вплив. Побудовано нелінійне рівняння типу Гінзбурга-Ландау для опису слабонелінійної конвективної нестійкості з урахуванням ТМ-ефектів:

$$A_1 \frac{\partial A}{\partial \tau} - A_2 A + A_3 A^3 = 0, \quad (5)$$

де A_1, A_2, A_3 - постійні коефіцієнти виду:

$$A_1 = \frac{a^2}{Pr} + \frac{k_c^2 Ra_c}{a^4} \cdot \frac{\left(1 + q_\alpha \Pi_\alpha \left(1 + \frac{Pm}{Pr}\right) - q_\alpha \frac{\pi^2 Pm^3}{a^4 Pr^2} Ro \sqrt{Ta}\right) (a^4 + \pi^2 Q) + q_\alpha \frac{\pi Pm}{a^2 Pr^2} \cdot \delta}{a^4 + \pi^2 Q - q_\alpha R_\alpha k_c^2} -$$

$$\frac{\pi^2 Q Pm}{a^2 Pr} - \frac{\pi \sqrt{Ta}}{a^6 (a^4 + \pi^2 Q - k_c^2 q_\alpha R_\alpha) Pr} \times$$

$$\times \left[\delta \cdot (a^4 - k_c^2 q_\alpha R_\alpha) - \pi k_c^2 a^2 Q Pr R_\alpha \left(1 + q_\alpha \Pi_\alpha \left(1 + \frac{Pm}{Pr}\right) - q_\alpha \frac{\pi^2 Pm^3}{a^4 Pr^2} Ro \sqrt{Ta}\right) \right],$$

$$\delta = \frac{\pi a^2 \sqrt{Ta}}{a^4 + \pi^2 Q - k_c^2 q_\alpha R_\alpha} \cdot \left[(1 + Ro)(a^4 - k_c^2 q_\alpha R_\alpha) + \pi^2 Q Pm (Pm Ro - 1) \right] -$$

$$- \frac{\pi a^2 k_c^2 R_\alpha Q (1 + Pm)}{a^4 + \pi^2 Q - q_\alpha R_\alpha k_c^2} + \frac{\pi^3 Pm^2}{a^2} Q Ro \sqrt{Ta}, \quad A_2 = \frac{k_c^2 Ra_c}{a^2 Pr} (1 + q_\alpha \Pi_\alpha),$$

$$\Pi_\alpha = \frac{\pi^2 Pm Pr \sqrt{Ta} (1 + Ro(1 - Pm)) + k_c^2 R_\alpha}{a^4 + \pi^2 Q - k_c^2 q_\alpha R_\alpha}, \quad A_3 = \frac{k_c^4 Ra_c}{8a^4 Pr} \cdot \frac{(1 + q_\alpha \Pi_\alpha)(1 - q_\alpha^{(2)} \Pi_\alpha)^2 (a^4 + \pi^2 Q)}{a^4 + \pi^2 Q - k_c^2 q_\alpha R_\alpha} +$$

$$+ R_\alpha \cdot \frac{\pi^2 k_c^4 Q Pm^{-1} \sqrt{Ta} (1 + q_\alpha \Pi_\alpha)(1 - q_\alpha^{(2)} \Pi_\alpha)^2}{8a^4 (a^4 + \pi^2 Q - k_c^2 q_\alpha R_\alpha)},$$

де $Pr = \nu / \chi$ - число Прандтля, $Pm = \nu / \eta$ - магнітне число Прандтля, $Ta = \frac{4\Omega_0^2 h^4}{\nu^2}$ -

число Тейлора, $Q = \frac{B_0^2 h^2}{\rho_0 \mu \nu \eta}$ - число Чандрасекара, $Ra = \frac{g \beta_T (\Delta T) h^3}{\nu \chi}$ - число Релея,

безрозмірний параметр термо-е.р.с.: $R_\alpha = \frac{\Delta \alpha \Delta T}{\eta B_0}$. Безрозмірні параметри

$$q_N = \frac{N T_0 B_0^2}{\rho_0 c_p \mu \chi (\Delta T)}, \quad q_\alpha = \frac{\alpha T_0 B_0}{\rho_0 c_p \mu \chi (\Delta T)} \left[\left(\frac{\mu \mathcal{L}}{\alpha} + 1 \right) \frac{\Delta T}{T_0} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right]$$

пов'язані з впливом ефектів Нернста, термо-е.р.с. та Ледюка-Рігі на процес теплоперенесення. Точне розв'язання рівняння (5) описує вихід генерованого тороїдального магнітного поля на стаціонарний рівень (див. Рис. 9).

У підрозділі 5.3 отримано нову шестивимірну систему нелінійних рівнянь, яка описує генерацію збурень тороїдального магнітного поля ТМ-нестійкістю:

$$\begin{cases} \dot{X} = -X + RY - TV - HU \\ \dot{V} = -V + HW + \sqrt{Ta}(1 + Ro)X \\ \dot{U} = -Pm^{-1}U + Pr^{-1}X \\ \dot{W} = -Pm^{-1}W - Pr^{-1}V + Ro\sqrt{Ta}U - GY \\ \dot{Y} = Pr^{-1}(-Y + X - XZ - q_1W - q_2WZ) \\ \dot{Z} = Pr^{-1}(-bZ + XY + q_2WY) \end{cases} \quad (6)$$

У рівнянні (6) запроваджено нові безрозмірні параметри q_1 , q_2 , які обумовлені впливом термомагнітних ефектів. Досліджено динаміку для кеплерівського профілю обертання з $Ro = -3/4$ і виявлено режими конвекції з хаотичними змінами напрямку та амплітуди збурень магнітного поля, що генерується. У підрозділі 5.4 описано новий тип ТМ-нестійкості в температурно стратифікованому тонкому шарі (товщини h) електронної рідини (плазми), що перебуває у постійному гравітаційному полі. Показано, що при зменшенні параметра h/r_d , який характеризує відношення масштабу конвекції h до дебаївського радіуса r_d , критичне число Релея Ra_{\min}^{st} зменшується. Це означає зниження порогу розвитку нестійкості та можливість спонтанної генерації магнітного поля.

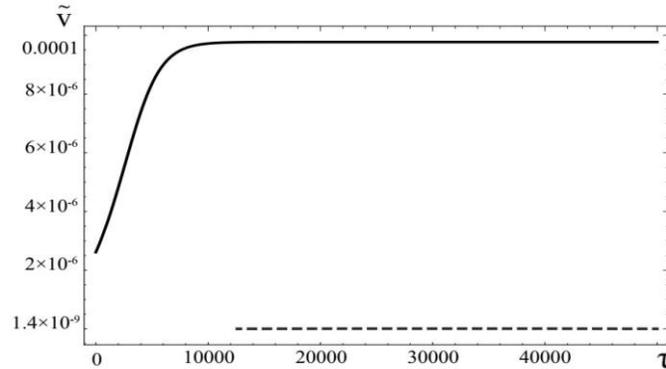


Рисунок 9. Залежність амплітуди $\tilde{v}(\tau)$ генерованого магнітного поля від часу τ . З урахуванням ТМ-ефектів (суцільна лінія) величина амплітуди $\tilde{v}(\tau)$ приблизно в 10^4 разів більше, ніж для випадку без ТМ-ефектів (штрихова лінія).

Отримано точне аналітичне розв'язання рівняння типу Гінзбурга-Ландау, яке демонструє насичення амплітуди магнітного поля на стаціонарному рівні (див. Рис. 10).

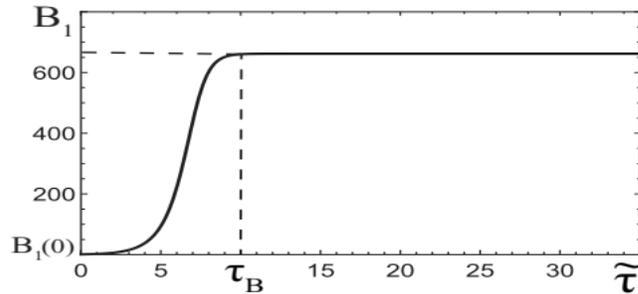


Рисунок 10. Залежність амплітуди B_1 генерованого магнітного поля від часу τ .

У підрозділі 5.5 розглянуто механізми генерації магнітного поля внаслідок ТМ-ефектів у повністю іонізованій плазмі як за наявності, так і за відсутності зовнішнього магнітного поля. З урахуванням залежності транспортних коефіцієнтів від магнітного поля використано рівняння Брагінського для виведення системи рівнянь, що описують динаміку магнітних та теплових збурень. Отримано умови утворення нестійкостей та можливість генерації магнітного поля з урахуванням теплопереносу і ТМ-ефектів. Виведено вирази для швидкостей зростання (інкрементів) збурень магнітного поля і температури у короткохвильовому діапазоні. Встановлено, що у слабо неоднорідній замагніченій плазмі з колінеарними градієнтами густини та температури магнітне поле може генеруватися оскільки механізм розвитку нестійкості стає конкурентним з механізмом гасіння навіть у випадку короткохвильових збурень (див. Рис. 11).

У шостому розділі «Дослідження біо-термальної конвекції в тонких шарах рідин» представлено результати комплексного дослідження біо-термальної конвекції в тонких шарах рідин з урахуванням різноманітних фізичних впливів і мікробіологічних механізмів. Основні положення дослідження цього розділу, здійсненого автором

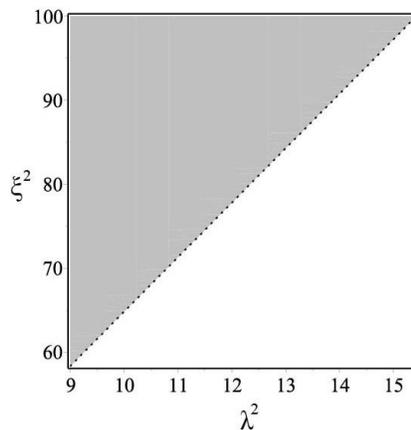


Рисунок 11. На графіку область ТМ-нестійкості у зовнішньому магнітному полі B_0 та $L_N = 3L_T$ виділена сірим кольором; $\xi = \omega_{Be} \tau$ параметр замагніченості плазми.

дисертаційної роботи, викладено в опублікованих наукових працях [18],[19],[24]-[27],[28]. У підрозділі 6.1 розглянуто нестійкість біо-термальної конвекції в шарі

високопористого середовища, насиченого ньютонівською рідиною з гіротаксичними мікроорганізмами. Встановлено, що збільшення швидкості мікроорганізмів (число Пекле), інтенсивності гіротаксису та температурного градієнта (число Релея-Дарсі) сприяє зменшенню критичного порога нестійкості. Натомість підвищення ефективної в'язкості (число Дарсі) та швидкості обертання середовища (число Тейлора) чинить стабілізуючий вплив. Підрозділ 6.2 присвячено впливу гармонічної модуляції на біо-термальну конвекцію в обертовій системі. Доведено, що зі зростанням частоти модуляції Ω тепловіддача зменшується, що веде до зниження варіацій числа Нуссельта Nu . Водночас підвищення амплітуди модуляції δ посилює ефективність теплоперенесення, а сферична форма мікроорганізмів додатково сприяє покращенню теплообміну. У підрозділі 6.3 досліджено вплив періодично змінного гравітаційного поля та наскрізного вертикального потоку на біо-термальну конвекцію Дарсі-Брінкмана. Доведено, що вертикальний потік може відігравати двоїсту роль: у залежності від параметрів він або підсилює, або послаблює процеси тепло- та масоперенесення. У підрозділі 6.4 розглянуто магнітну конвекцію в горизонтальному шарі пористого середовища, насиченого нанорідиною з гіротаксичними мікроорганізмами. Визначено, що вертикальне магнітне поле та зростання числа Дарсі підвищують стійкість системи. Водночас середня пористість, число Льюїса, модифікований коефіцієнт дифузії та концентраційне число Релея сприяють дестабілізації системи. Підвищення концентрації мікроорганізмів стимулює розвиток магнітної біоконвекції. Підрозділ 6.5 присвячено впливу обертання (через силу Коріоліса) та гармонічної гравітаційної модуляції на біо-термальну конвекцію. Продемонстровано, що зростання числа Тейлора Ta стабілізує систему, відтермінуючи початок нестійкості та зменшуючи інтенсивність теплоперенесення. У підрозділі 6.6 досліджено тепломасоперенесення в пористому середовищі під впливом одночасної дії обертання, гравітаційної модуляції та внутрішнього джерела тепла. Для опису біо-термальної конвекції під впливом обертання, гравітаційної модуляції та внутрішнього

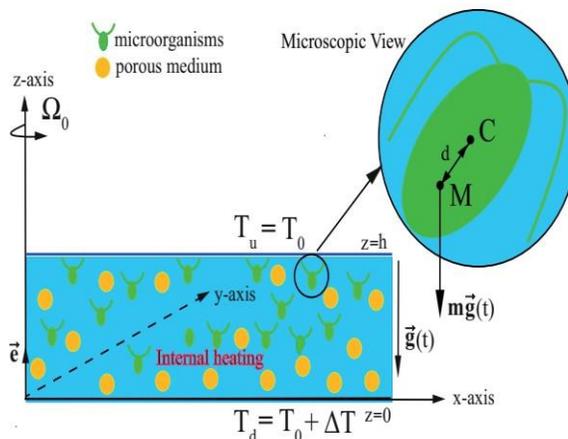


Рисунок 11. Схема руху гіротаксичних мікроорганізмів у шарі пористого середовища, що обертається, за наявності гравітаційної модуляції та внутрішнього джерела тепла.

джерела тепла побудовано шестивимірну нелінійну систему типу Лоренца, яка демонструє властивості симетрії та дисипації:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{X} = -DX - TV + f_m(RY - \tilde{R}_b Y) \\ \dot{Y} = \mathcal{V}_a^{-1}(-(1-b)Y + X - XZ) \\ \dot{Z} = \mathcal{V}_a^{-1}(-(\gamma - b)Z + XY) \\ Y = \sigma \mathcal{V}_a^{-1}(-L_b^{-1}Y - ((2 - f_m)\gamma_1 + \gamma_2)X - XZ) \\ Z = \sigma \mathcal{V}_a^{-1}(-\gamma L_b^{-1}Z + XY) \\ \dot{V} = -DV + \sqrt{Ta}X \end{array} \right. \quad (7)$$

де змінні X і V представляють поля швидкості, Y і Z описують зміни температури вздовж горизонтального та вертикального напрямків, а змінні \tilde{Y} і \tilde{Z} відповідають за зміни концентрації мікроорганізмів у цих же напрямках; D, R, \tilde{R}_b, T, b - безрозмірні параметри, пов'язані з ефектами пористості, теплової та біоконвекції, обертання, внутрішнього нагрівання. Виявлено, що зростання амплітуди модуляції суттєво посилює теплові та масові потоки, тоді як зростання частоти модуляції зменшує вплив. У підрозділі 6.7 досліджено роль теплової модуляції у конвекції в середовищі з термотактичними мікроорганізмами. Встановлено, що повільні часові коливання параметрів модуляції значно впливають на перенесення. Чисельний аналіз включає дослідження трьох типів різних теплових граничних умов, щоб зрозуміти вплив температурної модуляції на теплопередачу Nu і масоперенесення Sh . Перелічимо такі граничні умови: а) синфазна модуляція (IPM) $\varphi = 0$, б) протифазна модуляція (OPM) $\varphi = \pi$, в) модуляція лише нижньої межі (LBMO). Зокрема, протифазна модуляція (OPM) та модуляція нижньої межі (LBM) демонструють помітний ефект, тоді як синфазна модуляція (IPM) чинить слабкий вплив і є близькою до немодульованого режиму. Установлено, що число Пекле (параметр термотаксису) може викликати як стабілізацію, так і дестабілізацію в системі.

ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена дослідженню як лінійних, так і нелінійних механізмів формування дисипативних структур у різних гідродинамічних середовищах (газах, рідинах і плазмі) під впливом зовнішніх полів. Особливу увагу приділено випадкам, коли середовище містить наночастинки або активну матерію у вигляді мікроорганізмів з різними типами таксису. Проаналізовано умови виникнення нелінійних когерентних структур і складних просторово-часових структур. Основні результати, отримані в дисертації, такі:

1. Побудовано теорію нелінійного вихрового динамо для однорідної в'язкої рідини, що обертається, під дією дрібномасштабної зовнішньої сили. Встановлено, що на лінійній стадії великомасштабні вихрові структури формуються внаслідок

нестійкості типу α -ефекту, зумовленої поєднаним впливом сили Коріоліса та зовнішньої дрібномасштабної сили. У випадку неспіральної сили нестійкість виникає лише за умови відхилення осі обертання від вертикалі. Знайдено нові стаціонарні рішення у вигляді локалізованих вихрових структур: спіральних кінків, нелінійних хвиль Бельтрамі та кінків з перегином профілю швидкості.

2. Побудовано теорію нелінійного вихрового динамо для стратифікованої атмосфери та нанорідин. Показано, що врахування температурної стратифікації та джерела конденсаційного тепловиділення суттєво підсилює великомасштабні збурення. Розроблено теорію параметричної генерації вихрових структур у стратифікованій нанорідині з похилим обертанням та виявлено новий механізм їх формування без температурного градієнта, обумовлений зростанням концентрації наночастинок. Встановлено, що зі збільшенням частоти та хвильового числа параметричної дії ефективність генерації знижується. Отримано локалізовані рішення у вигляді нелінійних хвиль і кінків.

3. Побудовано самоузгоджену теорію магніто-вихрового динамо для електропровідного середовища, що обертається, з дрібномасштабною спіральною силою. Встановлено, що великомасштабні вихрові та магнітні структури на лінійній стадії виникають незалежно через гідродинамічний і магнітогідродинамічний α -ефекти, зумовлені взаємодією сили Коріоліса та зовнішньої дрібномасштабної сили. Отримано стаціонарні рішення у вигляді нелінійних хвиль, кінків і спіральних структур. Для випадку похилого обертання та неспіральної дрібномасштабної сили доведено, що нестійкість можлива лише за умови відхилення вектора обертання від вертикалі.

4. Розроблено самоузгоджену нелінійну теорію магніто-вихрового динамо у температурно-стратифікованому електропровідному середовищі з дрібномасштабними спіральностями. Проведено оцінки структур для сонячної плазми, які узгоджуються з експериментальними спостереженнями щодо масштабів і часових характеристик. Доведено можливість існування регулярних структур (нелінійні хвилі, кінки, солітони) та хаотичних стаціонарних структур. Отримано систему нелінійних рівнянь для великомасштабних полів у стратифікованому середовищі, що похило обертається, з урахуванням зовнішньої дрібномасштабної неспіральної сили та наявності зовнішнього магнітного поля. Показано, що без зовнішнього магнітного поля генерація великомасштабних полів (ВВС та ВМП) зумовлена нестійкостями типу α -ефектів (ГД та МГД). За наявності зовнішнього магнітного поля темпи зростання великомасштабних полів (ВВС та ВМП) збігаються, причому слабке зовнішнє поле не заважає генерації, а сильне - пригнічує її. Виявлено нову нестійкість α -типу в температурно-стратифікованій плазмі, що виникає під дією похилого магнітного поля та неспіральної дрібномасштабної сили. Встановлено стабілізуючий вплив ефекту Нернста, який зі зростанням зменшує швидкість розвитку нестійкості.

5. Побудовано лінійну теорію конвективної нестійкості в тонкому шарі електропровідної рідини, що неоднорідно обертається у вертикальному магнітному

полі. Встановлено, що неоднорідне обертання з негативними $Ro < 0$ знижує пороги стаціонарної та коливальної нестійкості. Отримано нелінійне рівняння типу Гінзбурга-Ландау, що описує еволюцію кінцевої амплітуди збурень, для слабонелінійної конвективної нестійкості. Виявлено, що модуляція обертання є основним фактором підсилення теплоперенесення, а найменший внесок має модуляція температури. З'ясовано, що збільшення частоти модуляції Ω зменшує тепло- та масоперенесення незалежно від знаку Ro , тоді як зростання амплітуди модуляції δ його підсилює. Для магнітної конвекції в нанорідині з урахуванням ефекту струму Холла встановлено, що при малих значеннях параметра Холла ($M < 5$) спостерігається стабілізуючий вплив на виникнення конвекції, а при великих параметрах ($M > 5$) — дестабілізуючий вплив.

6. Встановлено, що пороги стаціонарної та коливальної конвективної нестійкості в спіральному магнітному полі є нижчими порівняно з аксіальним магнітним полем незалежно від профілю обертання (значень Ro). Доведено, що присутність наночастинок знижує критичне число Релея для стаціонарної нестійкості Ra_{\min} як у випадку аксіальної, так і спіральної магнітоконвекції з неоднорідним обертанням. Азимутальна складова спірального магнітного поля дестабілізує систему при позитивних значеннях магнітного числа Россбі $Rb > 0$.

7. Для опису слабонелінійної стадії магнітної конвекції в електропровідній рідині, що неоднорідно обертається, отримані 6D і 8D рівнянь нелінійної динаміки, що демонструють хаотичну поведінку. За допомогою методу аналогового моделювання (інтегратори, помножувачі, суматори тощо) було розроблено електронні схеми для 6D та 8D рівнянь нелінійної динаміки. Продемонстровано, що розробка електронних схем нових генераторів хаосу, які описують реальні фізичні явища, дозволяє здійснювати фізичне моделювання рівнянь нелінійної динаміки як альтернативу чисельному моделюванню.

8. Отримано дисперсійне співвідношення для малих термомагнітних (ТМ) збурень в електропровідній рідині, що неоднорідно обертається у зовнішньому аксіальному магнітному полі $B_0 \parallel OZ$. У разі відсутності зовнішнього магнітного поля $B_0 = 0$, з повільно змінними градієнтами температури ∇T_0 та коефіцієнта питомої термо-е.р.с. $\nabla \alpha$, визначено інкременти зростання ТМ-нестійкості. Виявлено, що в низькопровідних середовищах генерація магнітного поля пригнічується внаслідок значних втрат, обумовлених теплопровідністю та в'язкістю. Натомість у високопровідних середовищах генерація магнітного поля стає ефективною за умови переважання ефекту Ледюка-Риги (замагнічування теплопровідності) над конвективним перенесенням тепла.

9. На основі методів слабонелінійного аналізу побудовано нелінійне рівняння типу Гінзбурга-Ландау, яке описує розвиток ТМ-нестійкості з урахуванням нелінійних ефектів і генерації магнітного поля. Точне аналітичне розв'язання цього рівняння демонструє насичення амплітуди генерованого тороїдального магнітного поля та досягнення стаціонарного режиму. Отримано нову 6D динамічну систему нелінійних рівнянь з урахуванням генерації збурень тороїдального магнітного поля ТМ-

нестійкістю. Виявлено режими конвекції для кеплерівського ($Ro = -3/4$) профілю обертання, при яких виникають хаотичні зміни напрямку (інверсії) та амплітуди збурень генерованого магнітного поля.

10. Отримано новий тип термомагнітної (ТМ) нестійкості в стратифікованому за температурою тонкому шарі електронної рідини (плазмі), що знаходиться у постійному гравітаційному полі. Отримано точне аналітичне рішення рівняння типу Гінзбурга-Ландау, яке показало вихід на стаціонарний рівень амплітуди магнітного поля, що генерується. Отримані оцінки амплітуд таких збурень відповідають характерним значенням магнітних полів, спостережуваних у нейтронних зорях на ранніх стадіях еволюції.

11. Доведено, що в незамагніченій плазмі з колінеарними градієнтами густини та температури швидкість зростання ТМ-збурень перевищує аналогічну величину в замагніченій плазмі. Крім того, у сильно замагніченій неоднорідній плазмі магнітне поле може генеруватися навіть у випадку короткохвильових збурень.

12. Встановлено, що в біо-термальній конвекції в шарі високопористого середовища, насиченого ньютонівською рідиною з гіротаксичними мікроорганізмами, збільшення швидкості руху мікроорганізмів (числа Пекле), параметра гіротаксису та температурного перепаду між межами шару (числа Релея-Дарсі) знижує критичний поріг виникнення біо-термальній конвективній нестійкості. Виявлено, що підвищення частоти модуляції Ω призводить до зменшення тепловіддачі, що проявляється у зниженні амплітуди варіацій числа Нуссельта Nu у часі. Водночас, збільшення амплітуди модуляції δ сприяє посиленню теплообміну. Сферична форма мікроорганізмів виявилася сприятливою для ефективної теплопередачі за умов модуляції гравітаційного поля.

13. Тепло- і масоперенос посилюється у присутності наскрізного потоку, що спрямований проти сили тяжіння $Re_0 > 0$, і, навпаки, знижується при потоці, що збігається з напрямком гравітації $Re_0 < 0$. Збільшення числа Тейлора Ta , що відповідає інтенсивності обертання, стабілізує систему, затримуючи початок конвекції й знижуючи теплопередачу. Натомість зростання внутрішнього параметра нагріву R_i чинить дестабілізуючий вплив на систему.

14. Встановлено, що термотактичні мікроорганізми активно реагують на періодичні коливання температури. У випадку синфазної модуляції (ІРМ) частота та амплітуда коливань практично не впливають на тепломасоперенос - поведінка системи подібна до немодульованого випадку. Для випадків протифазної модуляції (ОРМ) і модуляції температури на нижній межі (LBMO) характерна коливальна динаміка чисел Nu та Sh . Виявлено, що зі збільшенням додатного числа Пекле $Pe > 0$ мікроорганізми спрямовано рухаються вздовж температурного градієнта, що спричиняє їх локалізацію, пригнічує біо-термальну конвекцію й знижує інтенсивність тепло- та масопереносу. Натомість при збільшенні абсолютного значення від'ємного числа Пекле $Pe < 0$, коли мікроорганізми рухаються проти градієнта температури, середовище стає дестабілізованим, що веде до посилення біо-термальній конвекції та

підвищення ефективності переносу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1*. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics* (Pergamon Press, Oxford, 1987).
- 2*. M. J. Lighthill, On displacement thickness, *J. Fluid Mech.* **4**, 383 (1958). <https://doi.org/10.1017/S0022112058000525>
- 3*. M. C. Cross and P. C. Hohenberg, Pattern formation outside of equilibrium, *Rev. Mod. Phys.* **65**, 851 (1993). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.65.851>
- 4*. A. C. Newell and J. A. Whitehead, Finite bandwidth, finite amplitude convection, *J. Fluid Mech.* **38**, 279 (1969). <https://doi.org/10.1017/S0022112069000176>
- 5*. P. Manneville, *Dissipative Structures and Weak Turbulence* (Academic Press, Boston, 1990).
- 6*. A. V. Getling, *Rayleigh-Benard Convection: Structures and Dynamics* (World Scientific, Singapore, 1998).
- 7*. F. H. Busse, Transition to turbulence in Rayleigh-Bénard convection, *Topics in Applied Physics* **45**, 97 (1981). https://doi.org/10.1007/3-540-13319-4_15
- 8*. M. Steenbeck, F. Krause, and K.-H. Rädler, Berechnung der mittleren Lorentz-Feldstärke für ein elektrisch leitendes Medium in turbulenter, durch Coriolis-Kräfte beeinflusster Bewegung, *Z. Naturforsch.* **21a**, 369 (1966). <https://doi.org/10.1515/zna-1966-0401>
- 9*. E. N. Parker, Hydromagnetic dynamo models, *Astrophys. J.* **122**, 293 (1955). <http://dx.doi.org/10.1086/146087>
- 10*. G. Moffat, *Magnetic Field Generation in Electrically Conducting Fluids* (Cambridge University Press: Cambridge, 1978).
- 11*. F. Rincon, Dynamo theories, *J. Plasma Phys.* **85**, P.205850401(2019). <https://doi.org/10.1017/S0022377819000539>
- 12*. S. M. Tobias, The turbulent dynamo, *J. Fluid Mech.* **912**, P1 (2021). <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.1055>
- 13*. U. Frisch, *Turbulence: The Legacy of A.N. Kolmogorov* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139170666>
- 14*. A. S. Monin and A. M. Yaglom, *Statistical Fluid Mechanics*, Vol. 2 (MIT Press, Cambridge, 1975).
- 15*. S. M. Tobias, F. Cattaneo, and N. H. Brummell, On the generation of organized magnetic fields, *Astrophys. J.* **728**, 153 (2011). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/728/2/153>
- 16*. A. Gailitis et al., Magnetic field saturation in the Riga dynamo experiment, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 3024 (2001). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.3024>
- 17*. R. Stieglitz and U. Müller, Experimental demonstration of a homogeneous two-scale dynamo, *Magnetohydrodynamics* **38**, 27 (2002). <http://doi.org/10.22364/mhd>
- 18*. Ya. Zeldovich, A. Ruzmaikin, and D. Sokoloff, *Magnetic Fields in Astrophysics*

(Gordon and Breach, New York, 1983).

19*. F. Krause and K.-H. Rädler, *Mean-Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory* (Pergamon Press, Oxford, 1980).

20*. A. Brandenburg, Advances in mean-field dynamo theory and applications to astrophysical turbulence, *J. Plasma Phys.* **84**, 735840404 (2018).
<https://doi.org/10.1017/S0022377818000806>

21*. S. Childress and A. M. Soward, Convection-driven hydromagnetic dynamo, *Phys. Rev. Lett.* **29**, 837 (1972).

22*. S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in *Development and Applications of Non-Newtonian Flows*, edited by D. A. Signier and H. P. Wang (ASME, New York, 1995), Vol. 66, p. 99.

23*. J. A. Eastman et al., Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 718 (2001). <https://doi.org/10.1063/1.1341218>

24*. J. Buongiorno, Convective transport in nanofluids, *ASME J. Heat Transfer* **128**, 240 (2006). <https://doi.org/10.1115/1.2150834>

25*. D. Y. Tzou, Thermal instability of nanofluids in natural convection, *Int. J. Heat Mass Transfer* **55**, 2967 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.09.014>

26*. D. A. Nield and A. V. Kuznetsov, The onset of convection in a horizontal nanofluid layer of finite depth, *Eur. J. Mech. B/Fluids* **29**, 217 (2010).
<https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2010.02.003>

27*. D. A. Nield and A. Bejan, *Convection in Porous Media*, 5th ed. (Springer, New York, 2017). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49562-0>

28*. D. B. Ingham and I. Pop, *Transport Phenomena in Porous Media* (Pergamon, Oxford, 1998).

29*. W. J. Minkowycz, A. Haji-Sheikh, and K. Vafai, On departure from local thermal equilibrium in porous media due to a rapidly changing heat source: the Sparrow number, *Int. J. Heat Mass Transfer* **42**, 3373 (1999).

30*. J. R. Platt, Bioconvection patterns in cultures of free-swimming organisms, *Science* **133**, 1766 (1961). <https://doi.org/10.1126/science.133.3466.1766>

31*. S. Childress, M. Levandowsky, and E. A. Spiegel, Pattern formation in a suspension of swimming microorganisms, *J. Fluid Mech.* **69**, 591 (1975).
<https://doi.org/10.1017/S0022112075001577>

32*. T. J. Pedley and J. O. Kessler, Hydrodynamic phenomena in suspensions of swimming microorganisms, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **24**, 313 (1992).
<https://doi.org/10.1146/annurev.fl.24.010192.001525>

33*. N. A. Hill and T. J. Pedley, Bioconvection, *Fluid Dyn. Res.* **37**, 1 (2005).
<https://doi.org/10.1016/j.fluiddyn.2005.03.002>

34*. J. Toner and Y. Tu, Long-range order in a two-dimensional XY model with random impurities, *Phys. Rev. B* **58**, 4828 (1998).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.4326>

- 35*. V. A. Shaik, Z. Peng, J. F. Brady, and G. J. Elfring, Confined active matter in external fields, *Soft Matter* **19**, 1384 (2023). <http://dx.doi.org/10.1039/D2SM01135B>
- 36*. A. Martín-Gómez, D. Levis, A. Díaz-Guilera, and I. Pagonabarraga, Collective motion of active Brownian particles in complex environments, *Soft Matter* **14**, 2610 (2018). <https://doi.org/10.1039/C8SM00020D>
- 37*. M. C. Marchetti et al., Hydrodynamics of soft active matter, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 1143 (2013). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.1143>
- 38*. S. Ghorai and N. A. Hill, Development and stability of gyrotactic plumes in bioconvection, *J. Fluid Mech.* **400**, 1 (1999). <https://doi.org/10.1017/S0022112099006473>
- 39*. M. P. Brenner, D. Lohse, and T. F. Dupont, Bubble shape oscillations and the onset of sonoluminescence, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 954 (1995). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.954>
- 40*. S. Chandrasekhar, *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability* (Clarendon Press, Oxford, 1961).
- 41*. D. W. Hughes and M. R. E. Proctor, Magnetic fields in the solar convection zone: magnetoconvection and magnetic buoyancy, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **20**, 187 (1988). <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.20.010188.001155>
- 42*. J. R. Melcher, *Continuum Electromechanics* (MIT Press, Cambridge, 1981). [https://doi.org/10.1016/0169-5983\(89\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0169-5983(89)90016-6)
- 43*. R. J. Turnbull and J. R. Melcher, Electrohydrodynamic Rayleigh-Taylor bulk instability, *Phys. Fluids* **12**, 1160 (1969). <https://doi.org/10.1063/1.1692646>
- 44*. S. H. Davis, The stability of time-periodic flows, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **8**, 57 (1976). <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.08.010176.000421>
- 45*. B. S. Bhadauria, Time-periodic heating of Rayleigh-Bénard convection, *Phys. Scr.* **73**, 296 (2006). <https://doi.org/10.1088/0031-8949/73/3/010>
- 46*. E. L. Koschmieder, *Bénard Cells and Taylor Vortices* (Cambridge University Press, Cambridge, 1993).
- 47*. W. Eckhaus, *Studies in Non-Linear Stability Theory* (Springer-Verlag, New York, 1965). <https://doi.org/10.1002/zamm.19660460815>

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **М.І. Копп**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. The Large scale instability in rotating fluid with small scale force, *Open Journal of Fluid Dynamics*, 2015, v.5, p. 128-138. arXiv:1504.06953v1 [physics.flu-dyn].
2. **М.І. Копп**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Nonlinear Vortex Structures in Obliquely Rotating Fluid, *Open Journal of Fluid Dynamics*, 2015, v.5, p.311-321.
3. Яновський В.В., Тур А.В., **Копп М.І.** Квазідвовимірні великомасштабні вихрові та магнітні структури в магнітній гідродинаміці. Проблеми теоретичної фізики. Наукові праці. Випуск 4. Харків: ХНУ імені В.М. Каразіна, 2020, 412-506 с.
4. **М.І. Копп**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Nonlinear Dynamo in a Rotating Electrically

Conducting Fluid, East European Journal of Physics, 2017, v.4(1), p. 4-27. (SJR квартиль Q4).

5. **M.I. Kopp**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Instabilities in the non-uniformly rotating medium with temperature stratification in the external uniform magnetic field, 2019, East European Journal of Physics, v.1, p. 4-33. (SJR квартиль Q4).

6. **M.I. Kopp**, A.V. Tur, K.N. Kulik, V.V. Yanovsky. Nonlinear dynamo in obliquely rotating stratified electroconductive fluid in a uniform magnetic field, East European Journal of Physics, 2020, v.1, p. 5-36. arXiv:1807.01986v1 [physics.flu-dyn]. (SJR квартиль Q4).

7. **M.I. Kopp**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Weakly nonlinear magnetic convection in a nonuniformly rotating electrically conductive medium under the action of modulation of external fields, East European Journal of Physics, 2020, v.2, p. 5-37. arXiv:1911.05368v1 [physics.plasm-ph]. (SJR квартиль Q4).

8. **M.I. Kopp**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Magnetic convection in a nonuniformly rotating electrically conductive medium in an external spiral magnetic field, Fluid Dynamics Research, 2021, v. 53, 015509. arXiv:1905.05472v1 [physics.plasm-ph]. (SJR квартиль Q2).

9. **M.I. Kopp**, K.N. Kulik, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Generation of magnetic fields by thermomagnetic effects in a nonuniformly rotating layer of an electrically conductive fluid, Journal of Physical Studies, 2021, v. 25, No. 2, 2401. arXiv:2104.11068v1 [physics.flu-dyn]. (SJR квартиль Q4).

10. **M.I. Kopp**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Nonlinear Vortex Structures Driven by Small-Scale Nonhelical Forces in Obliquely Rotating Stratified Fluids, Ukrainian Journal of Physics, 2021, v. 66, No. 6, p. 478-488. arXiv:1706.00223 [physics.flu-dyn]. (SJR квартиль Q3).

11. **M.I. Kopp**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Hydrodynamic α -effect in a rotating stratified moist atmosphere driven by small-scale nonhelical force, Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, 2021, v. 115, No. 5-6, p. 551-576. (SJR квартиль Q2).

12. **M.I. Kopp**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Vortex Dynamo in an Obliquely Rotating Stratified Nanofluid by Small-Scale Non-Helical Forces, East European Journal of Physics, 2021, v.2, p.51-72. (SJR квартиль Q4).

13. **M.I. Kopp**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Spontaneous generation of magnetic fields in thin layers of stratified plasma, Physics of Plasmas, 2022, v. 29, 042115. (SJR квартиль Q1).

14. **Michael Kopp**, Andrii Kopp. A New 6D Chaotic Generator: Computer Modelling and Circuit Design, International Journal of Engineering and Technology Innovation, 2022, v. 12, no. 4, p. 288-307. (SJR квартиль Q3).

15. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky. Influence of the Hall current on the convective and magnetorotational instability in a thin layer of an electrically conductive nanofluid, Physics of Fluids, 2022, v. 34, 064107. (SJR квартиль Q1).

16. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky. Thermal convection in a rotating porous medium layer saturated by a nanofluid under a helical magnetic field, Journal of Applied Physics, 2022, v. 132, 084302. (SJR квартиль Q2).

17. **M.I. Kopp**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Thermomagnetic instabilities in a nonuniformly rotating electrically conductive fluid, *Journal of Physical Studies*, 2022, v. 26, No. 4, 4401. (SJR квартиль Q4).

18. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky, U. S. Mahabaleshwar. A Bio-Thermal Convection in a Porous Medium Saturated by Nanofluid Containing Gyrotactic Microorganisms Under an External Magnetic Field, *East European Journal of Physics*, 2022, v.4, p.23-47. (SJR квартиль Q4).

19. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky. Darcy-Brinkman bio-thermal convection in a porous rotating layer saturated by Newtonian fluid containing gyrotactic microorganisms, *Ukrainian Journal of Physics*, 2023, v. 68, No. 1, p. 30-37. (SJR квартиль Q3).

20. **M.I. Kopp**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Chaotic Dynamics of Magnetic Fields Generated by Thermomagnetic Instability in a Nonuniformly Rotating Electrically Conductive Fluid, *Journal of Physical Studies*, 2023, v. 27, No. 2, 2403. (SJR квартиль Q3).

21. **M. Kopp**, A. Kopp. A New 8D Lorenz-like Hyperchaotic System: Computer Modelling, Circuit Design and Arduino Uno Board Implementation, *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 2023, v. 15, No. 2, p. 37-46.

22. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky. Vortex dynamo in rotating media, *East European Journal of Physics*, 2023, v.2, p. 7-50. (SJR квартиль Q4).

23. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky. Investigating the effect of gravity modulation on weakly nonlinear magnetoconvection in a nonuniformly rotating nanofluid layer, *East European Journal of Physics*, 2023, v.3, p. 207-222. (SJR квартиль Q4).

24. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky. Effect of gravity modulation on weakly nonlinear bio-thermal convection in a porous medium layer. *Journal of Applied Physics*, 2023, v. 134, 104702. (SJR квартиль Q2).

25. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky. Gravity modulation and its impact on weakly nonlinear bio-thermal convection in a porous layer under rotation: a Ginzburg-Landau model approach, *Journal of Porous Media*, v. 27(9), 2024, p. 1-17. (SJR квартиль Q3).

26. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky. Weakly Nonlinear Bio-Thermal Convection in a Porous Media Layer Under Rotation, Gravity Modulation, and Heat Source, *East European Journal of Physics*, 2024, v. 1, p. 175-191. (SJR квартиль Q3).

27. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky. The Effect of Throughflow and Gravitational Modulation on Weakly Nonlinear Bio-Thermal Convection in a Porous Medium Layer, *Ukrainian Journal of Physics*, 2024, v. 69(2), p. 82-95. (SJR квартиль Q4).

28. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky. Thermal modulation effects on weakly nonlinear bio-thermal convection with thermotactic microorganisms in a liquid layer, *Journal of Physical Studies*, 2024, v. 28(3), 3401. (SJR квартиль Q4).

29. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky. Generation of large-scale magnetic-vortex structures in stratified magnetized plasma by a small-scale force, *Physics of Plasmas*, 2024, v. 31, 082301. (SJR квартиль Q2).

30. **M.I. Kopp**, V.V. Yanovsky. Features of generation of spontaneous magnetic fields in fully ionized plasma, *Problems of Atomic Science and Technology*, 2024, №6(154), p. 25-

30. (SJR квартиль Q3).

31. **Michael Kopp**, Inna Samuilik. A New 6D Two-wing Hyperchaotic System: Dynamical Analysis, Circuit Design, and Synchronization, *Chaos Theory and Applications*, 2024, v. 6(4), p. 273-283. (SJR квартиль Q1).

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

32. **М.І. Копп**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. The large scale instability and nonlinear vortex structures in obliquely rotating fluid with small scale non spiral force. XIII International Conference "PLASMA ELECTRONICS AND NEW METHODS OF ACCELERATION" August 24-28, 2015, Kharkiv, Ukraine. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015, №4(98), p. 264-269. (SJR квартиль Q3).

33. **М.І. Копп**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Chaotic magnetoconvection in non-uniformly rotating electroconductive fluids XIV International Conference "PLASMA ELECTRONICS AND NEW ACCELERATION METHODS" August 27-31, 2018, Kharkiv, Ukraine. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2018, №4 (116), p. 230-234. arXiv:1805.11894v1 [astro-ph.EP]. (SJR квартиль Q3).

34. **М.І. Копп**, A.V. Tur, V.V. Yanovsky. Large-scale magnetic and vortex structures in a helical turbulent convection. *Proceedings of the VII International Conference "Modern Problems of Physics"*. Dushanbe: publishing house «Donish», 2020, p. 39-43.

35. **Michael Kopp**, Andrii Kopp. Computer modeling and Arduino Uno implementation of a 6D hyperchaotic system with four quadratic nonlinearities. XXXII Міжнародна науково-практична конференція ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: НАУКА, ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ОСВІТА, ЗДОРОВ'Я. MicroCAD-2024, 22-25 травня 2024 р., Kharkiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, p. 1216.

36. **Michael Kopp**, Andrii Kopp. Adaptive control and synchronization of a 6D hyperchaotic system with application to secure communication. XXXII Міжнародна науково-практична конференція ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: НАУКА, ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ОСВІТА, ЗДОРОВ'Я. MicroCAD-2024, 22-25 травня 2024 р., Kharkiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, p. 1217.

37. **М.І. Копп**, I. Samuilik. Analysis of a new 6D hyperchaotic system. 83rd International Scientific Conference of the University of Latvia "Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations", 29 January 2025, Riga, Latvia. *Book of Abstracts*, p. 4.

38. **Michael Kopp**, Andrii Kopp. Modeling chaotic behavior of nonlinear dynamo equations using an artificial neural network. XXXIII Міжнародна науково-практична конференція ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: НАУКА, ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ОСВІТА, ЗДОРОВ'Я. MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р., Kharkiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, p. 1382.

39. **М.І. Копп**, I.I Samuilik. Computer modeling and circuit implementation of a fivedimensional artificial neural network system. X International Scientific-Practical Conference Physical and Technological Problems of Transmission, Processing and Storage

АНОТАЦІЯ

***Копп М.Й.* Генерація нелінійних структур в гідродинамічних середовищах під впливом зовнішніх полів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 «Теоретична фізика» (природничі науки, Е5 - фізика і астрономія (0533)). - Інститут монокристалів НАН України, Харків, 2025.

У дисертації розвинено нелінійну самоузгоджену теорію вихрового та магнітного динамо в рамках динамічного підходу, за якого дрібномасштабна турбулентність породжується внаслідок параметричного впливу зовнішньої дрібномасштабної сили. Перевага динамічного підходу перед статистичним полягає в простішому способі побудови самоузгодженої нелінійної теорії динамо на основі асимптотичного методу багатомасштабних розкладів. Отримано замкнені рівняння нелінійного вихрового та магнітного динамо в стратифікованих, в'язких і нанорідних середовищах, що обертаються. На лінійній стадії генерація великомасштабних вихрових і магнітних структур відбувається за рахунок нестійкості типу α -ефекту. На нелінійній стадії великомасштабної нестійкості отримано розв'язки у вигляді стаціонарних локалізованих структур: нелінійних хвиль, кінків і спіральних кінків. В рамках модифікованої моделі Бусінеска вперше досліджено вплив неоднорідного обертання та зовнішнього магнітного поля (аксіального й спірального) на поріг і конвективну нестійкість у тонких шарах гідродинамічних середовищ. Встановлено, що негативний профіль неоднорідного обертання знижує поріг магнітної конвекції, тобто чинить дестабілізуючий вплив. Позитивний профіль неоднорідного азимутального магнітного поля також має дестабілізуючий ефект. Побудовано шести- та восьмимірні динамічні системи, які відтворюють хаотичну еволюцію магнітного поля та формування дивних атракторів у середовищах, що неоднорідно обертаються. Проаналізовано термомагнітні (ТМ) ефекти, які сприяють самогенерації магнітних полів у електропровідних середовищах, що неоднорідно обертаються. Встановлено, що ТМ-нестійкість виникає за наявності колінеарних градієнтів температури та питомої термо-е.р.с. Урахування ТМ-ефектів знижує поріг розвитку конвективної нестійкості для будь-якого профілю неоднорідного обертання, тобто чинить дестабілізуючий вплив. Запропоновано моделі ТМ-динамо та досліджено їх хаотичну поведінку. Розвинено нелінійну теорію ТМ-нестійкості в температурно-стратифікованому тонкому шарі електронної рідини (плазми). Оцінки індукованих магнітних полів можуть бути застосовні для нейтронних зірок на ранніх стадіях еволюції. Встановлено, що в сильно замагніченій неоднорідній плазмі з колінеарними градієнтами густини й температури ТМ-нестійкість може розвиватися навіть за

короткохвильових збурень. Доведено, що модуляція гравітації, температури, зовнішнього магнітного поля та кутової швидкості обертання дозволяє керувати інтенсивністю тепло- й масопереносу. Розроблено теорію біо-термальної конвекції в нанорідинах з гіротактичними мікроорганізмами, яка враховує броунівську та термофоретичну дифузію. Встановлено, що підвищення концентрації мікроорганізмів посилює магнітну конвекцію, а сферична форма клітин сприяє формуванню теплової нестійкості.

Ключові слова: багатомасштабні асимптотичні розклади, дрібномасштабна турбулентність, сила Коріоліса, α -ефект, нелінійні хвилі, кінки, хаотичні структури, спіральне магнітне поле, магніторотаційна нестабільність, конвекція Релея-Бенара, слабонелінійна теорія, термомагнітна нестабільність, хаотична поведінка, біо-термальна конвекція, повністю іонізована плазма.

ABSTRACT

Kopp M.I. Generation of nonlinear structures in hydrodynamic media under the influence of external fields. – A qualification scientific work in manuscript form.

Dissertation for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences in the specialty 01.04.02 “Theoretical Physics” (Natural Sciences, E5 – Physics and Astronomy (0533)).

– Institute for Single Crystals of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The dissertation develops a nonlinear self-consistent theory of vortex and magnetic dynamos within a dynamic approach, wherein small-scale turbulence is generated as a result of parametric excitation by an external small-scale force. The advantage of the dynamic approach over the statistical one lies in the simpler construction of a self-consistent nonlinear dynamo theory based on the asymptotic method of multiscale expansions. Closed-form equations for nonlinear vortex and magnetic dynamos are obtained for rotating, stratified, viscous, and nanofluid media. At the linear stage, the generation of large-scale vortex and magnetic structures occurs due to instabilities of the α -effect type. At the nonlinear stage of large-scale instability, stationary localized structures are obtained in the form of nonlinear waves, kinks, and spiral kinks. Within a modified Boussinesq model, the influence of inhomogeneous rotation and external magnetic fields (both axial and helical) on the threshold and convective instability in thin layers of hydrodynamic media is studied for the first time. It is shown that a negative inhomogeneous rotation profile lowers the threshold for magnetic convection, i.e., it has a destabilizing effect. A positive profile of inhomogeneous azimuthal magnetic field also exhibits a destabilizing effect. Six- and eight-dimensional dynamical systems are constructed to reproduce the chaotic evolution of the magnetic field and the formation of strange attractors in inhomogeneously rotating media. Thermomagnetic (TM) effects contributing to the self-generation of magnetic fields in such environments are analyzed. It is shown that TM instability arises in the presence of collinear gradients of temperature and specific thermoelectromotive force (thermo-e.m.f.). Taking TM effects into

account lowers the threshold for the development of convective instability for any rotation profile, thus also having a destabilizing impact. TM dynamo models are proposed and their chaotic behavior is examined. A nonlinear theory of TM instability is developed for a temperature-stratified thin layer of electron fluid (plasma). Estimates of induced magnetic fields may be applicable to neutron stars in the early stages of their evolution. It is established that in strongly magnetized, inhomogeneous plasma with collinear density and temperature gradients, TM instability can develop even under short-wavelength perturbations. It is demonstrated that modulation of gravity, temperature, external magnetic field, and angular rotation speed enables control over the intensity of heat and mass transfer. The theory of bio-thermal convection in nanofluids containing gyrotactic microorganisms is developed, accounting for Brownian and thermophoretic diffusion. It is shown that increasing the concentration of microorganisms enhances magnetic convection, while the spherical shape of the cells promotes the development of thermal instability.

Key words: multiscale asymptotic expansions, small-scale turbulence, Coriolis force, α -effect, nonlinear waves, kinks, chaotic structures, helical magnetic field, magnetorotational instability, Rayleigh-Benard convection, weakly nonlinear theory, thermomagnetic instability, chaotic behavior, biothermal convection, fully ionized plasma.