



Відгук

офіційного опонента на дисертацію Горєва В'ячеслава Миколайовича «Скорочений опис нерівноважних систем з урахуванням релаксаційних процесів» на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Узагальнення методу Чепмена–Енскога на етапи еволюції більш ранні, ніж гідродинамічний, є актуальною проблемою сучасної теорії нерівноважних процесів. У рецензованій дисертації метод Чепмена–Енскога розв'язування кінетичних рівнянь узагальнюється з метою врахування релаксаційних процесів для систем в околі гідродинамічного стану, що запроваджує в теорії необхідний новий малий параметр. При цьому термін «релаксаційний процес» трактується у вузькому сенсі, саме як процес, що може відбуватися і в просторово-однорідному стані системи.

Зазначене узагальнення методики в дисертації спрямовано з метою подолання відомої проблеми відсутності малого параметра в теоріях релаксації Ландау і Греда. Теорія Ландау широко використовується при вивченні релаксаційних явищ між підсистемами нерівноважної системи і ґрунтується на уявленні про локальну рівновагу. Класичний приклад її застосування – це теорія релаксації температур компонент плазми. Теорія Греда розроблялася як теорія релаксації з певним припущенням про нерівноважну функцію розподілу, остаточний вигляд якої обирається в рамках конкретної задачі. Добре відомий приклад її застосування – теорія маквелівської релаксації, яка описує формування в рідині дисипативних потоків («тринадцятимоментне наближення»).

Узагальнений у дисертаційній роботі метод Чепмена–Енскога застосовується до теорії максвеллівської релаксації простого газу та гідродинаміки повністю іонізованої плазми при наявності в ній процесів релаксації температур і швидкостей компонент. При цьому значна увага приділяється корекціям до наближення локальної рівноваги і модифікації методу Греда в умовах розгляду релаксації поблизу її завершення. Робота ґрунтується на методі скороченого опису Боголюбова, основними засадами якого є ідея про ієрархію етапів еволюції нерівноважної системи та функціональна гіпотеза. **Викладене вище не викликає сумніву в актуальності дисертаційної роботи Горєва В.М.**

Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури і додатків. У вступі обґрунтовується вибір теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й основні задачі дослідження, методи й теоретичні основи розв'язання задач, розкрито наукову новизну, визначено наукове й практичне значення проведених досліджень.

У першому розділі дисертації наведено огляд наукової літератури за темою дисертаційної роботи. Розглянуто застосовність теорії, яка базується на кінетичному рівнянні Больцмана, в сучасній теорії нерівноважних процесів. Наведено основні положення методу скороченого опису, та його окремого випадку – методу Чепмена–Енскога. Надаються сучасні посилання, які ілюструють широке застосування методів Чепмена–Енскога та Греда в статистичній фізиці. Проаналізовано роботи попередників щодо дослідження часів релаксації, кінетичних коефіцієнтів та мод повністю іонізованої плазми. Огляд написано кваліфіковано, він навіть може бути використаним при викладанні теорії нерівноважних процесів в навчальному процесі університетів.

У другому розділі дисертаційної роботи розроблено загальну теорію релаксаційних процесів в околі гідродинамічного стану – узагальнений метод Чепмена–Енскога. Результати розділу стосуються кінетики однокомпонентного газу, проте, як видно з подальших розділів роботи, загальна структура рівнянь у різних порядках теорії збурень така ж і для двокомпонентних систем. Крім малих градієнтів додатковим малим параметром вважається малі відхилення релаксаційних параметрів скороченого опису від своїх гідродинамічних значень. У роботі отримано рівняння для внесків у функцію розподілу та часові рівняння для параметрів скороченого опису в різних порядках теорії збурень за цими па-

раметрами. У підсумку узагальнений метод Чепмена–Енскога веде до суттєвої модифікації методу Греда

Як застосування розробленої теорії досліджено максвелівську релаксацію просто-риво-однорідного газу, стан якого описується густинами потоків енергії та імпульсу. Розв'язки інтегральних рівнянь розвинутої теорії досліджуються методом обірваного розвинення за ортогональними поліномами Соніна. Показано, що відомі результати Греда для функції розподілу та часів релаксації потоків відповідають наближенню одного полінома Соніна. Це наближення повністю визначається означеннями параметрів скороченого опису, тобто так званими додатковими умовами теорії. У підсумку до результатів Греда знайдено корекції у наближенні двох поліномів Соніна.

У третьому розділі дисертаційної роботи на основі узагальненого методу Чепмена–Енскога розглядається задача релаксації швидкостей та температур компонент у просторово-однорідній повністю іонізованій електрон-іонній плазмі, яка описується кінетичним рівнянням Ландау. Вважається, що плазма перебуває у стані, близькому до рівноваги, що запроваджує новий малий параметр теорії. Функція розподілу компонент знаходиться як розв'язок кінетичного рівняння, що веде до корекцій наближення локальної рівноваги. Існування цих корекцій має, безумовно, не тільки теоретичне, а і світоглядне значення.

Параметрами скороченого опису в розробленій теорії обираються малі відхилення швидкості і температури електронної компоненти плазми від їх рівноважних значень і вважаються малими у порівнянні з останніми. Швидкість та температура іонної компоненти також виражаються через ці величини. Здобувачем досліджено випадки як лінійної, так і квадратичної за даними малими параметрами релаксації.

Інтегральні рівняння розвинутої теорії спочатку досліджено в дисертації в теорії збурень за малим відношенням маси електрона до маси іона, а отримані більш прості рівняння для внесків цієї теорії збурень наближено розв'язані методом розвинення за поліномами Соніна. Показано, що в рамках лінійної теорії релаксації наближення локальної рівноваги дає вірні результати для функцій розподілу компонент лише у головному порядку за відношенням мас та в наближенні одного полінома. При цьому в роботі отримано поправки до результатів наближення локальної рівноваги в наступних порядках цієї теорії збурень. Показано, що ці поправки дають корекції і до часів релаксації температур та швидкостей компонент. В рамках квадратичної теорії релаксації показано, що наближення локальної рівноваги дає вірні результати не для всіх частин функції розподілу навіть у головному наближенні за малим відношенням мас та у наближенні одного полінома. Показано, що внески від квадратичної теорії релаксації у часові рівняння для параметрів скороченого опису системи уповільнюють релаксаційні процеси.

Четвертий розділ дисертації присвячений побудові гідродинаміки плазми з урахуванням процесів релаксації температур і швидкостей компонент, тобто дворідинної гідродинаміки плазми. Ця теорія широко використовується у фізиці плазми (починаючи з ґрунтовної роботи Брагінського), але послідовному розгляду релаксації в роботах попередників заважала відсутність малого параметра. В дисертації показано, що за параметри скороченого опису, у відповідності до загальної теорії другого розділу, доцільно обирати густини кількості частинок компонент, масову швидкість, температуру, яка відповідає повній енергії системи (тобто параметри скороченого опису однорідинної гідродинаміки багатоконпонентної системи) та малі відхилення температури та швидкості електронів та іонів від їх гідродинамічних значень. Тим самим в роботі запроваджено додатковий до звичайного параметру малості градієнтів.

Розроблена теорія в основному наближенні за указаними відхиленнями дає звичайну однорідинну гідродинаміку. Показано, що результати аналізу рівнянь цього наближення в послідовній теорії збурень автора за відношенням мас узгоджуються з відомими в літературі результатами. Слід зазначити, що розробка в роботі при розгляді плазми систематичної теорії збурень за відношенням мас веде до послідовного врахування динаміки іонів.

При аналізі внесків в потоки доведено, що завдяки процесу релаксації швидкості потоки енергії містять градієнт масової швидкості, а потоки імпульсу – градієнти температури та кількості числа частинок. З'ясовано, що повний потік енергії системи містить градієнт масової швидкості навіть у головному порядку за відношенням мас. Отримано поправки до в'язкості і теплопровідності однорідної гідродинаміки, пов'язані з релаксацією температур компонент. Для коефіцієнтів у функціях розподілу компонент, кінетичних коефіцієнтів результати доведено дисертантом до чисельних виразів.

П'ятий розділ дисертації присвячено дослідженню мод плазми на основі кінетичних рівнянь Ландау та Ландау–Власова. Здобувачем зазначено, що хоча самоузгоджене поле має значний вплив на моди, проте задача послідовного дослідження в теорії за малим відношенням мас мод кінетичного рівняння Ландау є важливою і актуальною. Вона є частиною програми дослідження мод плазми на основі ідеї взаємодії мод рівняння Ландау і мод електромагнітного поля в рівноважній плазмі. Це дозволяє зменшити розмірність задачі при розгляді плазми як системи електромагнітного поля та системи зарядів із короткосяжною взаємодією. Як результат для кінетичного рівняння Ландау при малому хвильовому векторі отримано шість гідродинамічних (дві зсувних, дві звукових, теплова та дифузійна) та чотири релаксаційні (кінетичні) моди відповідно до кількості параметрів скороченого опису розробленої теорії.

Моди кінетичного рівняння Ландау–Власова з електричним самоузгодженим полем досліджено автором у «бездисипативному» наближенні, в якому він обмежується нульовим наближенням за градієнтами для функції розподілу компонент, отриманим у третьому розділі. На це наближення самоузгоджене поле не впливає, оскільки воно відсутнє у просторово-однорідному випадку. Рівняння гідродинаміки для параметрів скороченого опису мають той же вигляд, що в четвертому розділі, із додатковим внеском електричного поля в часові рівняння для швидкості та її відхилення й доповнюються рівняннями для поля.

У підсумку отримано п'ять гідродинамічних мод (дві зсувні, дві звукові, теплова), три кінетичні моди (описують релаксацію температур та поперечних складових швидкостей) та дві кінетичні моди релаксаційного згасання плазмових коливань. При цьому розглядалися малі хвильові вектори і в законах дисперсії враховано тільки внески, що відповідають розгляду «бездисипативного» наближення. Підхід, запропонований у роботі, дозволяє послідовно врахувати динаміку іонів на основі побудови систематичної теорії збурень за відношенням мас. Тут слід зазначити, що хоча отриманий коефіцієнт релаксаційного згасання плазмових хвиль набагато менший за плазмову частоту, зазначений механізм згасання є важливим, оскільки відповідний коефіцієнт не залежить від хвильового вектору, а коефіцієнт згасання Ландау в області малих хвильових векторах стає експоненціально малим. У дисертації наведено числові значення радіусу Дебая, при яких коефіцієнт релаксаційного згасання більший за коефіцієнт згасання Ландау.

Новизна результатів, отриманих у дисертації, видна з наведеного змісту її розділів. Зокрема, автором уперше розроблено узагальнений метод Чепмена–Енскога, який враховує наявність в системі релаксаційних процесів, розглядаючи їх в околі гідродинамічного стану. Це запроваджує в теорію малий параметр, відсутній в підходах попередників, та веде до суттєвої модифікації методу Греда. На цій основі вперше послідовно побудовано теорію максвеллівської релаксації і гідродинаміку повністю іонізованої плазми при наявності в ній релаксації температур і швидкостей компонент. У гідродинаміці плазми вперше повно врахована динаміка іонної компоненти в рамках послідовної теорії збурень за відношенням мас. Розроблена теорія вперше дозволила систематично дослідити корекції до наближення локальної рівноваги. Уперше проведено послідовне дослідження кінетичних коефіцієнтів і мод плазми в умовах завершення в ній релаксаційних процесів.

Наукові положення дисертації, її висновки повно викладені в опублікованих працях. Вони опубліковані у 8 статтях у профільних наукових журналах (з них 4 індексуються у SCOPUS), у дев'яти працях міжнародних конференцій (з них 4 входять до бази SCOPUS). Результати роботи також апробовані на 24 міжнародних конференціях.

Автореферат дисертації вірно відображає основні її положення і результати. Дисертаційна робота цілком відповідає паспорту спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Практична цінність результатів, одержаних в дисертації, визначається тим, що розвинена у роботі загальна теорія релаксаційних станів в околі гідродинамічних може широко використовуватись у сучасній теорії нерівноважних процесів. Розробка в дисертації гідродинаміки плазми при наявності в ній релаксаційних процесів вирівнювання температур і швидкостей компонент може виконати стимулюючу роль у поглибленні досліджень з фізики плазми.

Дисертація є завершеним науковим дослідженням, за підсумком якого отримано нові науково обгрунтовані теоретичні результати, які в сукупності суттєві для розвитку сучасної статистичної фізики. Здобувач зробив вагомий внесок у важливий напрямок досліджень з теорії нерівноважних процесів.

Дисертація оформлена якісно. Вона і її автореферат написані гарною українською мовою.

У той же час можна висловити певні **зауваження до дисертації:**

1. У роботі наведено мало аргументів стосовно переваг використання поліномів Соніна порівняно з поліномами Ерміта, які поклав в основу свого підходу Гред.

2. Цікаво б було оцінити можливість експериментальної перевірки результатів дисертації і, зокрема, відхиленя від наближення локальної рівноваги в плазмі.

3. У дисертації не наведено аргументів за те, чому в методі Греда найбільша увага приділяється тринадцятимоментному наближенню, а не задачі з іншою кількістю моментів.

Вказані недоліки не впливають на загальну високу оцінку дисертаційної роботи. Друге зауваження взагалі може розглядатися як побажання щодо подальших досліджень здобувача.

На мою думку, дисертаційна робота Горєва В.М. «Скорочений опис нерівноважних систем з урахуванням релаксаційних процесів» є цілісним і завершеним дослідженням, в якому отримані нові науково обгрунтовані теоретичні результати, що вирішують проблему врахування релаксаційних процесів в околі гідродинамічних станів і суттєві для подальшого розвитку теорії нерівноважних процесів. Вона задовольняє всім вимогам до кандидатських дисертацій, які подаються на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика, зокрема, «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 зі змінами, затвердженими Постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015 р. та № 1159 від 30.12.2015 р., а її автор **Горєв В'ячеслав Миколайович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.**

Начальник відділу статистичної фізики та квантової теорії поля Інституту теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,
член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор

Ю.В. Слюсаренко

Підпис члена-кореспондента НАН України Слюсаренка Ю.В. ЗАСВІДЧУЮ

Вчений секретар ІТФ ННЦ ХФТІ, к.ф.-м.н.

А.І. Кірдин

