

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МОНОКРИСТАЛІВ**

На правах рукопису

СЛЮСАРЕНКО Юрій Вікторович



**МЕТОД СКОРОЧЕНОГО ОПИСУ В ТЕОРІЇ
ДОВГОХВИЛЬОВИХ НЕРІВНОВАЖНИХ ФЛУКТУАЦІЙ**

01.04.02 - "Теоретична фізика"

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора фізико - математичних наук**

Харків - 1996

ЛННБ України ім.В.Стефаніка

АВ 35.947



00739721 (Т)

Науковому Центрі
"Харківський національний інститут фізики"
тут"

Офіційні опоненти: —

- член-кореспондент НАН України,
професор Сльозов В.В.
- доктор фізико-математичних наук,
професор Галайко В.П.
- доктор фізико-математичних наук,
професор Адаменко І.М.

Провідна організація —

Інститут теоретичної фізики
НАН України, м. Київ

Захист відбудеться "11" 12 1996р. о 14⁰⁰ годині
на засіданні Спеціалізованої ради Д.02.11.01 при Інституті монокристалів.
Адреса: 310001, м. Харків - 1, пр. Леніна 60.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту
монокристалів НАН України

Автореферат розісланий "1" 11 1996р.

Вчений секретар

Спеціалізованої ради

Д 02.11.01

кандидат технічних наук

Л.В.Атрошенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації.

Побудова теорії довгих нерівноважних флуктуацій має не тільки фундаментальне значення для розвитку сучасної статистичної фізики, але й знаходить застосування у багатьох прикладних задачах. Загальний інтерес до кінетичної теорії довгохвильових флуктуацій виник у першу чергу у зв'язку з необхідністю динамічного обґрунтування звичайної кінетичної теорії, зокрема - у зв'язку з обґрунтуванням кінетичного рівняння Больцмана. Таке обґрунтування повинне пов'язувати два рівних підходи до опису еволюції складних систем (динамічну теорію, яка базується на гамільтоновій механіці та кінетичну теорію, виходячи з якої покладено Больцманом [1]), вирішуючи питання про перехід від зворотніх рівнянь гамільтонової механіки до незворотніх рівнянь статистичної механіки [1-4]. Серед величезної кількості праць, які присвячені динамічному обґрунтуванню статистичної механіки, особливе місце займає робота М.М.Боголюбова "Проблеми динамічної теорії у статистичній фізиці" [5], в якій дано найбільш глибокий аналіз проблеми та запропоновано метод скороченого опису еволюції систем багатьох частинок, який базується на фізично ясній та простій ідеї про ієрархію часів релаксації та принципу просторового послаблення кореляцій. Метод скороченого опису дозволяє побудувати регулярну процедуру одержання замкнених дисипативних кінетичних рівнянь виходячи з даншого ж ББГКІ зворотніх рівнянь для багаточастинкових функцій розподілу, даючи тим самим динамічне обґрунтування незворотнім кінетичним рівнянням [5,6].

Але послідовне динамічне обґрунтування статистичної механіки потребує відповіді на питання про роль довгохвильових флуктуацій на кінетичному етапі еволюції системи, що залишалось поза межами побудов звичайної кінетичної теорії Боголюбова [5,6].

Інтерес до побудови загальної теорії довгих нерівноважних флуктуацій породжений також визначальною роллю гідродинамічних довгохвильових флуктуацій у широкому класі задач теорії турбулентності, теорії "довгих гідродинамічних хвостів", теорії взаємодіючих мод (див. у зв'язку з цим [7-10]).

Відмічене коло задач потребує, у свою чергу, єдиного підходу, що базується на основних принципах статистичної механіки для побудови кінетичної теорії довгохвильових флуктуацій. Однак до недавнього

ЛНБ ім. С.Степаненка
АН України

часу в усіх відомих роботах (див., наприклад [11,12]), присвячених побудові кінетичної теорії макроскопічних флуктуацій, такий загальний підхід, що дозволяє розробити регулярну процедуру виведення еволюційних рівнянь теорії довгих нерівноважних флуктуацій, був відсутнім. Більш того, створювалось враження [11,12], що подібного підходу стосовно до задач кінетики макроскопічних флуктуацій зовсім не існує.

Зразком при розвитку загальної кінетичної теорії макроскопічних флуктуацій безсумнівно повинен слугувати оснований на методі скороченого опису Боголюбова підхід до побудови звичайної кінетичної теорії.

З цієї причини модифікація та розвиток методу скороченого опису стосовно до середовищ, які флуктують, є важливою та актуальною проблемою.

Метою роботи є подальший розвиток та узагальнення методу скороченого опису, сформульованого М.М.Боголюбовим для динамічного обґрунтування незворотніх кінетичних рівнянь, на випадок кінетики та гідродинаміки систем з довгохвильовими флуктуаціями. При цьому необхідно показати, що розвинута мікроскопічна теорія довгохвильових флуктуацій містить у собі звичайну кінетику та гідродинаміку без урахування флуктуацій, установивши тим самим зв'язок розвинутої більш загальної теорії із звичайною кінетичною теорією Боголюбова.

Проведені дослідження підпорядковані розвитку загального наукового напрямку дисертації - побудові підходу, заснованого на методі скороченого опису, до вивчення релаксаційних процесів у системах з довгими нерівноважними флуктуаціями.

У дисертації розв'язуються наступні задачі:

1. Визначення операції згладжування дрібномасштабних флуктуацій з метою коректного уведення повільних параметрів скороченого опису - згладжених багаточастинкових функцій розподілу.

2. Формулювання основних положень методу скороченого опису довгих нерівноважних флуктуацій.

3. Одержання (у підході, що базується на методі скороченого опису) рівнянь кінетики макроскопічних флуктуацій у наближенні слабкої взаємодії між частинками та малої густини числа частинок.

4. Установлення зв'язку кінетичної теорії довгохвильових флуктуацій із звичайною кінетичною теорією Боголюбова.

5. Одержання загальних рівнянь кінетики макроскопічних флуктуацій.

6. Вивчення переходу до флуктуаційно - гідродинамічного етапу еволюції та виведення загальних рівнянь гідродинаміки довгохвильових флуктуацій.

7. Побудова ефективних початкових умов до рівнянь флуктуаційної гідродинаміки.

8. Стохастична інтерпретація рівнянь еволюції макроскопічних флуктуацій.

9. Визначення нерівноважної ентропії для середовищ з довгохвильовими флуктуаціями та доведення H-теорем.

10. Вивчення деяких застосувань теорії довгих нерівноважних флуктуацій у теорії плазми та теорії "довгих гідродинамічних хвостів".

Наукова новизна роботи.

Послідовне узагальнення та розвиток методу скороченого опису стосовно до середовищ з флуктуаціями здійснено вперше. У межах цього методу основні питання, поставлені у дисертаційній роботі, послідовно вирішені також уперше. Розвинутий метод скороченого опису довгих нерівноважних флуктуацій має як фундаментальне, так і прикладне значення. Фундаментальність методу базується на фундаментальних принципах, що закладені в його основу, та на відповідності методу самій логіці розвитку сучасної статистичної фізики. Завдяки своїй універсальності, метод скороченого опису довгих нерівноважних флуктуацій може бути використаний при вивченні багатьох фізичних явищ у макроскопічних системах різноманітної природи, що виначає теоретичне та прикладне значення розвинутого методу.

Вірогідність. Практична цінність роботи.

Вірогідність одержаних результатів зумовлюється використанням автором дисертації сучасних методів теоретичної та математичної фізики а також збігом в окремих випадках одержаних результатів з результатами других авторів, одержаних другими методами.

Розв'язання поставлених у дисертації задач вимагало розвитку математичного апарату, за допомогою якого можуть бути досліджені, у принциповому відношенні, широке коло питань, що стосуються як загальної теорії релаксаційних процесів, так і її конкретних застосувань.

Одержані у мікроскопічному підході рівняння кінетики та гідродинаміки довгохвильових флуктуацій можуть бути використані при дослід-

женні різноманітних аспектів теорії турбулентності стисливої рідини та газу. У випадку нестисливої рідини загальні рівняння флуктуаційної гідродинаміки переходять у рівняння Хопфа, добре відоме у теорії турбулентності. Окремі результати дисертації можуть бути застосовані при вивченні різних питань теорії "довгих гідродинамічних хвостів" та теорії взаємодіючих мод. Заслужують уваги результати, завдяки яким з'являється змога досліджувати довгохвильові флуктуації у системах зі спонтанно порушеною симетрією.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані при виконанні подальших теоретичних досліджень, пов'язаних з вивченням еволюції макроскопічних флуктуацій у ННЦ ХФТІ, Харківському держуніверситеті, Інституті монокристалів, ІТФ НАН України, ОІЯД (Росія), а також у ряді теоретичних центрів за кордоном України та СНД.

Апробація роботи. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися: на Всесоюзній конференції по фізиці магнітних явищ, Донецьк, ДонФТІ АН УРСР, 1985;

на V Міжнародному симпозіумі по вибораних проблемах статистичної механіки, Дубна, ОІЯД, 1989;

на Всесоюзній конференції "Сучасні проблеми статистичної фізики", Харків, ХФТІ, 1991;

на Міжнародній школі по актуальним проблемам статистичної фізики, Львів, ІФКС АН УРСР, 1991;

на Міжнародній конференції "Нелінійні проблеми диференціальних рівнянь та математичної фізики - другі Боголюбівські читання", Київ, Інститут математики НАН України, 1992;

на Міжнародній конференції "Фізика в Україні", Київ, ІТФ ім. Боголюбова НАН України, 1993;

на Міжнародній робочій нараді по статистичній фізиці та теорії конденсованих станів, Львів, ІФКС НАН України, 1995;

на семінарах в університетах міст Ростов і Грайсвальд, НДР, 1989, 1990.

Особистий внесок автора у проведення досліджень та одержання усіх результатів дисертаційної роботи є вичначальним. Усі результати одержані або самям автором, або при його безпосередній участі.

У роботах [1-3,5,17,18] автору дисертації належать наступні результати:

* Сформульовані основні положення методу скороченого опису довгих нерівноважних флуктуацій як на флуктуаційно - кінетичному, так і на

флуктуаційно - гідродинамічному етапах еволюції системи.

* Розроблено методику розвитку теорії довгохвильових флуктуацій у термінах породжувачих функціоналів згладжених багаточастинкових функцій розподілу у випадку кінетичної теорії та породжувачих функціоналів згладжених кореляційних функцій густин адитивних інтегралів руху у випадку гідродинамічної теорії довгохвильових флуктуацій.

* На основі сформульованих основних положень методу скороченого опису побудовано кінетичну теорію макроскопічних флуктуацій. Установлено зв'язок побудованої кінетичної теорії довгохвильових флуктуацій із звичайною кінетичною теорією Боголюбова. Показано, що динаміка довгих нерівноважних флуктуацій на кінетичному етапі еволюції описується сциним функціоналом - узагальненням інтегралом віткень Боголюбова.

* Одержано загальні кінетичні рівняння теорії довгохвильових флуктуацій у больцманівському наближенні. Лінеаризовані загальні рівняння гідродинаміки довгохвильових флуктуацій одержані виходячи з лінеаризованих загальних рівнянь флуктуаційної кінетики у больцманівському наближенні у підході, заснованому на використанні методу власних функцій лінеаризованого інтегралу віткень Больцмана. Сам цей метод був модифікований на випадок наявності у системі довгохвильових флуктуацій.

* Одержано ефективні початкові умови до лінеаризованих рівнянь флуктуаційної гідродинаміки у випадку, коли в істинному початковому стані будь-які флуктуації відсутні.

* Виходячи з загальних нелінійних рівнянь кінетичної теорії довгохвильових флуктуацій одержано нелінійні загальні рівняння гідродинаміки довгохвильових флуктуацій у термінах породжувачих функціоналів згладжених кореляційних функцій густин адитивних інтегралів руху.

* Дано визначення нерівноважної ентропії при наявності у системі довгих нерівноважних флуктуацій та доведено Н-теорему як на флуктуаційно - кінетичному, так і на флуктуаційно - гідродинамічному етапах еволюції.

* Одержано узагальнення на випадок наявності флуктуацій добре відомого локально - рівноважного розподілу Максвелла.

* На основі одержаного асимптотичного по часу виразу (з урахуванням гідродинамічних кореляційних функцій) для одночастинкової функції розподілу відтворено основні результати теорії "довгих гідро-

динамічних хвостів”.

У роботі [4] автором

* розроблено метод власних функцій лінеаризованого інтегралу віттенберга Больдмана для розв'язання кінетичних рівнянь у гідродинамічному наближенні.

У роботах [7,8,13-16,20-22] автору цієї дисертації належать результати:

* У методі скороченого опису та методі квазісередніх одержані дисипативні рівняння еволюції систем зі спонтанно порушеною симетрією, які розглядаються у цих роботах, та вирази для кінетичних коефіцієнтів, що характеризують такі системи, у термінах кореляційних функцій.

У роботі [10] дисертантом одержано наступні результати:

* Розроблено процедуру усереднення за випадковими початковими умовами або за випадковою зовнішньою силою, що впливає на систему, довільних нелінійних рівнянь еволюції.

* На основі цієї процедури наведена стохастична інтерпретація одержаних у мікроскопічному підході рівнянь кінетики та гідродинаміки довгохвильових флуктуацій, виразів для характерних функціоналів розвинутої кінетичної та гідродинамічної теорії макроскопічних флуктуацій.

У роботі [11] автором зроблено наступне:

* Виходячи із загальних рівнянь флуктуаційно-гідродинамічної теорії одержано нелінійні рівняння динаміки парних гідродинамічних флуктуацій у газовому наближенні.

* Знайдено квазістаціонарні розв'язки (граничні пікли) цих рівнянь у бездисипативному наближенні та встановлено часовий інтервал існування цих розв'язків.

* Одержано вираз для швидкості розповсюдження пульсацій, яка складним нелінійним чином залежить від амплітуд флуктуацій.

* Вивчено питання стійкості знайдених квазістаціонарних розв'язків та визначено характерні часи виходу системи на граничні пікли як функціонали амплітуд граничних значень парних кореляційних функцій.

У роботах [12-14] автором

* одержано нелінійні рівняння динаміки покриттів поверхні твердого тіла адсорбованими атомами газів та досліджені стаціонарні розв'язки цих рівнянь.

Структура дисертації. Дисертація складається із Вступу, шести глав, завершення та Додатку. Повний об'єм дисертаційної роботи складає 71 сторінку та включає список літератури в 132 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі дається короткий історичний експурс в оглядім літератури по питанням, які стосуються тематики дисертації. Дано викладення основних положень методу скороченого опису Боголюбова [5]. Сформульовано основні положення, що виносяться на захист, схематично наведено зміст дисертації.

Перша глава "Кінетична теорія довгохвильових флуктуацій" призначена узагальненню на випадок довгохвильових флуктуацій методу скороченого опису М.М.Боголюбова та виведенню на основі цього методу загальних рівнянь кінетичної теорії макроскопічних флуктуацій. Дано визначення довгохвильових флуктуацій, що описуються огладженими багаточастинковими функціями розподілу у фазовому просторі $\bar{f}_s(x_1, \dots, x_s; t)$ ($x_i \equiv (\bar{x}_i, \bar{p}_i)$), які отримуються із звичайних багаточастинкових функцій розподілу $f_s(x_1, \dots, x_s; t)$ у результаті переходу до асимптотичної області $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| \gg r_0$ ($1 \leq i, j \leq s$, r_0 - радіус взаємодії між частинками). Набір таких повільних змінних уводиться до теорії з допомогою операції огладжування дрібномасштабних флуктуацій

$$f_s(x_1, \dots, x_s; t) \xrightarrow{|\bar{x}_i - \bar{x}_j| \gg r_0} \bar{f}_s(x_1, \dots, x_s; t) \equiv \mathcal{P} f_s(x_1, \dots, x_s; t) \quad (1)$$

де \mathcal{P} - символ операції огладжування. Після виконання асимптотичного переходу (1) функції $\bar{f}_s(x_1, \dots, x_s; t)$ містять тільки характерний просторовий макроскопічний масштаб L ($L \gg r_0$), який визначає зміни функцій $\bar{f}_s(x_1, \dots, x_s; t)$ на великих відстанях.

Уведення набору параметрів скороченого опису - огладжених багаточастинкових функцій розподілу дозволяє сформулювати стосовно до середовищ з флуктуаціями основні положення методу скороченого опису: принцип просторового послаблення кореляцій, функціональну гіпотезу, що відображає функціональну залежність після протікання часу хаотизації τ_0 точних багаточастинкових функцій розподілу від огладжених багаточастинкових функцій розподілу

$$f_s(x_1, \dots, x_s; t) \xrightarrow{\tau \gg \tau_0} f_s(x_1, \dots, x_s; \bar{f}_1(t), \bar{f}_2(t), \dots), \quad (2)$$

"граничні" умови для функціоналів кінетичної теорії довгохвильових флуктуацій

$$S_2^0(\tau) f_s(x_1, \dots, x_s; S_2^0(-\tau) \bar{f}_1(t), S_2^0(-\tau) \bar{f}_2(t), \dots) \xrightarrow{\tau \rightarrow -\infty} \bar{f}_s(x_1, \dots, x_s; t), \quad (3)$$

у випадку слабкої взаємодії між частинками та

$$\begin{aligned} \lim_{\tau \rightarrow -\infty} S_s(\tau) f_s(x_1, \dots, x_s; S_1^0(-\tau) \bar{f}_1(t), S_2^0(-\tau) \bar{f}_2(t), \dots) = \\ = \lim_{\tau \rightarrow -\infty} S_s(\tau) S_s^0(-\tau) \bar{f}_s(x_1, \dots, x_s; t), \end{aligned} \quad (3')$$

у випадку малої густини числа частинок (у формулах (3), (3') $S_s(\tau)$ - оператор еволюції комплексу із s взаємодіючих частинок та $S_s^0(\tau)$ - оператор еволюції комплексу із s незваємодіючих частинок).

Використання зформульованих основних положень методу скороченого опису еволюції макроскопічних флуктуацій дає змогу перетворити ланцюжок рівнянь ББГКІ у ланцюжки інтегральних рівнянь для точних (не згладжених) багаточастинкових функцій розподілу, які є функціоналами згладжених багаточастинкових функцій розподілу. Одержані ланцюжки інтегральних рівнянь зручні для розвитку ітеративної процедури по слабкій взаємодії між частинками або по малій густині числа частинок при побудові регулярної методики виведення кінетичних рівнянь для згладжених багаточастинкових функцій розподілу. Одержано ланцюжки кінетичних рівнянь для згладжених багаточастинкових функцій розподілу як у випадку слабкої взаємодії між частинками при довільній густині числа частинок, так і у випадку малої густини при довільній взаємодії між частинками (взаємодія, однак, не повинна приводити до появи зв'язаних станів).

Загальний зв'язок розвинутої кінетичної теорії довгохвильових флуктуацій зі звичайною кінетичною теорією полягає в тому, що нескінченний ланцюжок рівнянь кінетики макроскопічних флуктуацій, використовуючи породжуючі функціонали для згладжених багаточастинкових функцій розподілу, можна записати у термінах узагальненого інтеграла відткнень теорії Боголюбова, що надає цим рівнянням найбільш загальної та компактної форми:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} + \frac{\bar{p}}{m} \frac{\partial f(x, t)}{\partial \bar{x}} = \exp\left\{G\left(\frac{\delta}{\delta f}; \bar{g}\right)\right\} L(x; f), \quad (4) \\ \frac{\partial}{\partial t} G(u; \bar{g}) + \int dx u(x) \frac{\bar{p}}{m} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \frac{\delta G(u; \bar{g})}{\delta u(x)} = \\ = \left\{ \exp\left(G\left(u + \frac{\delta}{\delta f}; \bar{g}\right) - G(u; \bar{g})\right) - \exp\left(G\left(\frac{\delta}{\delta f}; \bar{g}\right)\right) \right\} \int dx u(x) L(x; f). \end{aligned}$$

де $f(x, t)$ - одночастинкова функція розподілу, а функціональний оператор $G\left(\frac{\delta}{\delta f}; \bar{g}\right)$ є породжуючий функціонал згладжених багаточастинкових

функцій розподілу \bar{g}_s , $s \geq 2$

$$g(u; \bar{g}) = \sum_{s=2}^{\infty} \frac{1}{s!} \int dx_1 \dots \int dx_s u(x_1) \dots u(x_s) \bar{g}_s(x_1, \dots, x_s; t), \quad (5)$$

у якому функціональний аргумент $u(x)$ замінено операцією функціонального диференціювання по $f(x)$. Узагальнений інтеграл віткень $L(x; f)$ кінетичної теорії Боголюбова дається виразом:

$$L(x_1; f) = \int dx_2 \{V(\bar{x}_1 - \bar{x}_2), f_2(x_1, x_2; f)\} \quad (6)$$

(величини $f_s(x_1, \dots, x_s; f)$ є функціоналами одночастинкової функції розподілу теорії Боголюбова). У больцманівському наближенні інтеграл віткень $L(x; f)$ квадратичний по одночастинковій функції розподілу

$$L(x; f) = \int dx' \int dx'' K(x; x', x'') f(x') f(x''), \quad (7)$$

($K(x; x', x'')$ - ядро інтегралу віткень Больцмана) і рівняння кінетики довгохвильових флуктуацій набувають вигляду

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} F(u; \bar{f}) + \int dx u(x) \frac{\bar{p}}{m} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \frac{\delta F(u; \bar{f})}{\delta u(x)} = \\ = \int dx \int dx' \int dx'' u(x) K(x; x', x'') \frac{\delta^2 F(u; \bar{f})}{\delta u(x') \delta u(x'')} \end{aligned} \quad (8)$$

де $F(u; \bar{f}) = \exp\{\int dx u(x) f(x) + g(u; \bar{g})\}$ - породжуючий функціонал згладжених багаточастинкових функцій розподілу $\bar{f}_s(x_1, \dots, x_s; t)$

$$F(u; \bar{f}) = 1 + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{s!} \int dx_1 \dots \int dx_s u(x_1) \dots u(x_s) \bar{f}_s(x_1, \dots, x_s; t). \quad (9)$$

У першій главі розглянуто також одне із застосувань кінетичної теорії макроскопічних флуктуацій у теорії плазми. Показано, що використовуючи рівняння кінетики довгохвильових флуктуацій у наближенні слабкої взаємодії з урахуванням динаміки тільки парних флуктуацій, можна відтворити основні результати квазілінійної теорії плазми.

У другій главі дисертації "Гідродинаміка довгохвильових флуктуацій у методі власних функцій лінеаризованого інтегралу віткень Больцмана" розглянуто виведення загальних лінеаризованих рівнянь флуктуаційної гідродинаміки на основі рівнянь кінетики довгохвильових

флуктуацій, одержаних у першій главі. З цією метою знайдено лінеаризовані рівняння кінетичної теорії макроскопічних флуктуацій у бoльцманівському наближенні. При розв'язанні цих рівнянь у флуктуаційно-гідродинамічному наближенні використано метод власних функцій лінеаризованого інтегралу зіткнень Больцмана, розвинутий нами при розв'язанні аналогічної задачі у звичайній кінетичній теорії. Виходячи з основних положень цього методу, введено параметри скороченого опису - флуктуації густин адитивних інтегралів руху і вивчено перехід до флуктуаційно-гідродинамічного етапу еволюції системи. Суттєво при цьому, що метод власних функцій лінеаризованого інтегралу зіткнень Больцмана не потребує використання функціональної гіпотези на флуктуаційно-гідродинамічному етапі еволюції системи. Навпаки, як продемонстровано у цій главі, у запропонованому підході функціональна гіпотеза може бути доведена.

Розроблено процедуру розв'язання лінеаризованих рівнянь кінетики довгохвильових флуктуацій у гідродинамічному наближенні, що заснована на використанні деяких специфічних властивостей лінеаризованого оператора зіткнень Больцмана, доведених у цій же главі. Як результат застосування цієї процедури одержано загальні лінеаризовані рівняння гідродинаміки довгохвильових флуктуацій з урахуванням дисипативних процесів:

$$\frac{\partial}{\partial t} G(v; \xi) + \int d\vec{x} v_{\alpha}(\vec{x}) \exp\left(\int d\vec{x}' \frac{\delta}{\delta \zeta_{\beta}(\vec{x}')} \frac{\delta}{\delta v_{\beta}(\vec{x}')}\right) T_{\alpha}(\vec{x}; \zeta(\vec{x}))|_{\zeta(\vec{x})=\zeta \times} \times G(v; \xi) = 0, \quad (10)$$

де функціонал $G(v; \xi)$ визначається формулою

$$G(v; \xi) = \int d\vec{x} v_{\alpha}(\vec{x}) \zeta_{\alpha}(\vec{x}, t) + \mathcal{G}(v; \xi), \quad (11)$$

у якій величина $\mathcal{G}(v; \xi(t))$ є породжуючим функціоналом кореляційних функцій $\zeta_{\alpha_1, \dots, \alpha_s}(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_s; t)$ густин адитивних інтегралів руху $\zeta_{\alpha}(\vec{x}, t)$

$$\mathcal{G}(v; \xi(t)) = \sum_{s=2}^{\infty} \frac{1}{s!} \int d\vec{x}_1 \dots \int d\vec{x}_s v_{\alpha_1}(\vec{x}_1) \dots v_{\alpha_s}(\vec{x}_s) \zeta_{\alpha_1, \dots, \alpha_s}(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_s; t). \quad (12)$$

Величина $T_{\alpha}(\vec{x}; \zeta(\vec{x}, t))$ у рівнянні (10) визначає еволюцію густин адитивних інтегралів руху у звичайній (не флуктуаційній) гідродинаміці

$$\frac{\partial}{\partial t} \zeta_{\alpha}(\vec{x}, t) = T_{\alpha}(\vec{x}; \zeta(\vec{x}, t)) \quad (13)$$

та дається виразом:

$$T_{\alpha}(\bar{x}; \zeta(\bar{x})) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\zeta_{\alpha i}(\zeta(\bar{x})) + \eta_{\alpha \beta; ij}(\zeta(\bar{x})) \frac{\partial \zeta_{\beta}(\bar{x})}{\partial x_j} \right), \quad (14)$$

у якому $\zeta_{\alpha i}(\zeta(\bar{x}, t))$ - густини потоків адитивних інтегралів руху у бездисипативному наближенні та $\eta_{\alpha \beta; ij}(\zeta(\bar{x}, t))$ - тензор дисипативних кінетичних коефіцієнтів.

Третя глава дисертації "Загальна гідродинамічна теорія довгохвильових флуктуацій. Метод Чепмена - Енскога" присвячена побудові нелінійної гідродинамічної теорії довгохвильових флуктуацій.

Нелінійна флуктуаційна гідродинаміка як і раніше будується виходячи із загальних кінетичних рівнянь теорії макроскопічних флуктуацій у бальдманівському наближенні. Для цього використано метод, багато в чому аналогічний методу Чепмена - Енскога, який використовується при виведенні рівнянь звичайної гідродинаміки із звичайних кінетичних рівнянь. Безперечно, що застосування такого методу у даному випадку вимагало певної його модифікації на випадок середовищ з флуктуаціями.

Сформульовано функціональну гіпотезу, яка відображає залежність від часу згладжених багаточастинкових функцій розподілу на флуктуаційно - гідродинамічному етапі еволюції тільки через посередництво параметрів скороченого опису - флуктуацій густин адитивних інтегралів руху

$$\bar{f}_s(x_1, \dots, x_s; t) \underset{\text{гидр}}{\approx} \bar{f}_s(x_1, \dots, x_s; \zeta_s(t)) \quad (15)$$

(τ - час релаксації). Знайдено вираз для згладжених багаточастинкових функцій розподілу на флуктуаційно - гідродинамічному етапі еволюції у нульовому та першому порядку теорії збуджень по малим просторовим градієнтам параметрів скороченого опису, що дозволило написати загальні нелінійні рівняння гідродинаміки довгохвильових флуктуацій у дисипативному наближенні

$$\frac{\partial}{\partial t} \zeta_{\alpha}(\bar{x}, t) = \exp \left\{ \mathcal{G} \left(\frac{\delta}{\delta \zeta}; \xi(t) \right) \right\} T_{\alpha}(\bar{x}, \zeta), \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \mathcal{G}(v; \xi(t)) = & \left\{ \exp \left\{ \mathcal{G} \left(v + \frac{\delta}{\delta \zeta}; \xi(t) \right) \right\} - \mathcal{G}(v; \xi(t)) \right\} - \\ & - \exp \left\{ \mathcal{G} \left(\frac{\delta}{\delta \zeta}; \xi_s(t) \right) \right\} \int d\bar{x} v_{\alpha}(\bar{x}) T_{\alpha}(\bar{x}, \zeta), \end{aligned}$$

де величина $T_\alpha(\vec{x}; \zeta)$ як і раніше дається виразом (14), а функціональний оператор $\exp\{G(\delta/\delta\zeta; \xi_\alpha(t))\}$ є породжуючим функціоналом $G(v; \xi(t))$ гідродинамічних кореляційних функцій (див. (12)), у якому замість функціонального аргументу $v_\alpha(\vec{x})$ підставлено операцію функціонального диференціювання по $\zeta_\alpha(\vec{x}, t)$.

При лінеаризації загальних нелінійних рівнянь гідродинаміки довгохвильових флуктуацій виходять рівняння, які повністю співпадають з рівняннями лінеаризованої флуктуаційної гідродинаміки, що виведені у попередній главі у методі власних функцій лінеаризованого інтегралу віткнень Больцмана.

Звертає на себе увагу позитивна схожість математичної структури рівнянь кінетики та гідродинаміки довгохвильових флуктуацій. Зокрема, як у випадку флуктуаційної кінетики динаміка системи визначалася єдиною величиною - узагальненим інтегралом віткнень Боголюбова, так у випадку флуктуаційної гідродинаміки динаміка системи визначається оператором, що описує еволюцію звичайних гідродинамічних параметрів. Остання обставина по-суті є формулюванням гіпотези Онзагера про еволюцію довгохвильових флуктуацій у відповідності з законами макроскопічної фізики. Такими законами є узагальнене кінетичне рівняння у випадку розгляду флуктуаційної кінетики та рівняння звичайної гідродинаміки при вивченні гідродинаміки довгохвильових флуктуацій.

Розроблено процедуру заміни флуктуаційно - гідродинамічних змінних. Для спеціального класу перетворень одержано прості співвідношення, що пов'язують між собою нові флуктуаційно - гідродинамічні параметри скороченого опису та флуктуації густин адитивних інтегралів руху. Розглянутий достатньо широкий клас перетворень для параметрів скороченого опису відрізняється тією властивістю, що він оберігає математичну структуру рівнянь гідродинаміки макроскопічних флуктуацій. Доведено інваріантність рівнянь гідродинаміки довгохвильових флуктуацій відносно перетворень Галілея.

У завершенні третьої глави для повноти викладення наведено розвинуту іншими авторами процедуру виведення рівнянь флуктуаційної гідродинаміки у гібсівському підході. Одержані у такому підході рівняння гідродинаміки макроскопічних флуктуацій абсолютно ідентичні, як і слід було чекати, відповідним рівнянням цієї дисертації.

У четвертій главі дисертації "Ефективні початкові умови до рівнянь флуктуаційної гідродинаміки та теорія "довгих гідродинамічних хвостів"

розглянуто вастосування розвинутої теорії довгохвильових флуктуацій у теорії "довгих гідродинамічних хвостів". Оскільки мова йде про знаходження часової асимптотики одночастинкової функції розподілу поблизу стану статистичної рівноваги, де амплітуди гідродинамічних флуктуацій малі, висхідними рівняннями при розв'язку такої задачі є лінеаризовані рівняння гідродинаміки довгохвильових флуктуацій, одержані у мікроскопічному підході у другій главі дисертації. Із цих рівнянь у наближенні, яке враховує вплив на динаміку системи тільки парних флуктуацій, і виходять основні рівняння теорії "довгих гідродинамічних хвостів". При розв'язанні цих рівнянь виникає питання про формулювання початкових умов до рівнянь флуктуаційної гідродинаміки. Слід підкреслити, що насправді йдеться про ефективні початкові умови до огаданих рівнянь. Справді, ці рівняння описують еволюцію парних довгохвильових гідродинамічних кореляційних функцій (початкове значення яких і треба знати), які у відповідності з методом скороченого опису співпадають з точними парними кореляційними функціями густин адитивних інтегралів руху тільки при часах, набагато більших за час релаксації системи. Причому, як показано у цій главі дисертації виходячи з основних положень статистичної механіки, довгохвильові гідродинамічні флуктуації неминуче розвиваються у процесі еволюції системи навіть у тому випадку, коли вони були відсутніми у початковий момент часу. Таким чином задача про знаходження ефективних початкових значень довгохвильових гідродинамічних кореляційних функцій приводиться до виразу їх у термінах величин, що описують справжній початковий стан системи.

У цій главі розроблено процедуру (васновану на використанні інтегралів руху для ланцюжка ББГКІ) знаходження ефективних (у відмічену розумінні) початкових умов до лінеаризованих загальних рівнянь флуктуаційної гідродинаміки (10). Ефективні початкові умови знайдено для довільних (не тільки парних) довгохвильових флуктуацій:

$$\xi_{\alpha_1 \dots \alpha_s}(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_s; 0) = \delta(\bar{x}_2 - \bar{x}_1) \dots \delta(\bar{x}_s - \bar{x}_1) \xi_{\alpha_1 \dots \alpha_s}, \quad (17)$$

$$\xi_{\alpha_1 \dots \alpha_s} = (-1)^{s+1} \frac{\partial \zeta_{\alpha_1}}{\partial Y_{\beta_1}} \dots \frac{\partial \zeta_{\alpha_s}}{\partial Y_{\beta_s}} \frac{\delta^{\alpha_1 \dots \alpha_s}}{\partial \zeta_{\beta_1} \dots \partial \zeta_{\beta_s}},$$

де Y_α - спряжені по відношенню до ζ_α узагальнені термодинамічні сили. При одержанні формул (17) уважалось, що справжній початковий стан системи у просторово - однорідному випадку задається виразом:

$$\delta f(\vec{p}, t) = -f_0(\vec{p})a(\vec{p}), \quad g_s(t=0) = 0, \quad s \geq 2 \quad (18)$$

де $\delta f(\vec{p}, 0)$ - відхилення початкової одночастинкової функції розподілу від рівноважного розподілу Максвелла $f_0(\vec{p}) = f_0(Y(\zeta); \vec{p})$

$$f_0(\vec{p}) = \exp(-Y_a \zeta_a(\vec{p})); \quad \int d\vec{p} f_0(\vec{p}) \zeta_a(\vec{p}) = \zeta_a, \quad (19)$$

($\zeta_a(\vec{p})$ - адитивні інтеграли руху), а величина $a(\vec{p})$ - довільна функція імпульсу \vec{p} ; при цьому під a у формулі (17) розуміється величина $a = \int d\vec{p} f_0(\vec{p}) a(\vec{p})$. З допомогою початкових умов (17) одержано загальний вираз для $\delta f(\vec{p}, t; a)$, що відображає затухання у часі одночастинкової функції розподілу:

$$\delta f(\vec{p}, t; a) \approx \frac{\partial f_0(\vec{p})}{\partial \zeta_a} \frac{\partial a}{\partial Y_a} - \frac{1}{2(2\pi)^3} \frac{\partial^2 f_0(\vec{p})}{\partial \zeta_{\alpha_1} \partial \zeta_{\alpha_2}} \times \int d\vec{k} \left(e^{i\vec{T}(\vec{k})} \frac{\partial \zeta}{\partial Y} \frac{\partial \zeta}{\partial Y} \frac{\partial^2 a}{\partial \zeta \partial \zeta} e^{i\vec{T}(-\vec{k})} \right)_{\alpha_1 \alpha_2}, \quad t > \tau_r$$

де $\vec{T}_{\alpha\beta}(\vec{k})$ - матриця, транспонована по відношенню до матриці $T_{\alpha\beta}(\vec{k})$ (див. (14))

$$T_{\alpha\beta}(\vec{k}) = -ik_j \frac{\partial \zeta_{\alpha j}}{\partial \zeta_\beta} - k_j k_l \eta_{\alpha\beta; ij} \quad (21)$$

Як легко бачити, квадратична залежність матриці $T_{\alpha\beta}(\vec{k})$ від вектора \vec{k} обумовлює степеневий характер релаксації у часі ($\delta f \sim t^{-3/2}$) одночастинкової функції розподілу до рівноважного максвелівського розподілу.

На основі виразу (20) одержано формули, які описують загальну структуру (у просторово - однорідному випадку) часових асимптотик довільних гідродинамічних кореляційних функцій, що дозволило відтворити основні результати теорії "довгих гідродинамічних хвостів". Аналогічні ж вирази одержано у просторово - неоднорідному випадку у напівфеноменологічному підході, основаному на модифікації стосовно до середовища з флуктуаціями відомого методу варіації середніх Боголюбова. Показано, що у випадку малих просторових неоднорідностей степеневий характер затухання у часі гідродинамічних кореляційних функцій спотворюється просторово - часовими осциляціями. При достатньо великих просторових неоднорідностях степеневий характер часових асимптотик змінюється експоненціальним.

Цей же напівфеноменологічний підхід може бути застосований для вивчення особливостей поведінки у часі кореляційних функцій у системах зі спонтанно порушеною симетрією, що продемонстровано у цій главі на прикладі розглядання еволюції довгохвильових флуктуацій в

одноосному феромагнетизму поблизу стану статистичної рівноваги. Показано, що в еволюції таких систем роль довгохвильових флуктуацій значно зростає у порівнянні з такою у нормальних системах. Остання обставина приводить до необхідності враховувати внесок у динаміку вроджених систем кореляторів більш високого порядку ніж другий. Шляхом вибіркового підсумовування внесків кореляторів густини сумарного магнітного моменту при $t \rightarrow \infty$, одержано загальний асимптотичний вираз для кореляційних функцій довільних квазілокальних операторів на "гідродинамічному" етапі еволюції феродіелектриків типу "зега вісь". Обговорено зв'язок одержаних формул з аналогічними виразами теорії "довгих гідродинамічних хвостів" у нормальних системах.

У п'ятій главі дисертації "Стохастична інтерпретація рівнянь кінетики та гідродинаміки довгохвильових флуктуацій. Нерівноважна ентропія" дана стохастична інтерпретація теорії макроскопічних флуктуацій, в основу якої покладено процедуру усереднення кінетичних рівнянь та рівнянь звичайної гідродинаміки за випадково розподіленими початковими умовами до цих рівнянь чи за випадковою зовнішньою силою, яка діє на систему. Процедуру усереднення за випадковими початковими умовами сформульовано у досить загальному вигляді. Легко бачити, що завдяки своїй універсальності, викладений метод перспективний не тільки при вивченні звичайної кінетики та гідродинаміки, але й при дослідженні динаміки флуктуацій у хімічно реагуючих системах, системах зі спонтанно порушеною симетрією, у процесі взаємодії частинок з поверхнею твердого тіла і так далі.

Застосування розвинутої процедури усереднення за випадковими початковими умовами дозволяє єдиним чином одержати рівняння кінетики та гідродинаміки нерівноважних флуктуацій, які ідентичні до аналогічних рівнянь, що одержані у цій дисертації у мікроскопічному підході. Можливість такого єдиного стохастичного виведення рівнянь еволюції макроскопічних флуктуацій роз'яснює відмічену у третій главі схожість математичної структури рівнянь кінетики довгохвильових флуктуацій та рівнянь флуктуаційної гідродинаміки. У такому ж підході дано стохастичну інтерпретацію процедури заміни флуктуаційно - гідродинамічних змінних.

Очевидно, що в силу відміченої тотожності відповідних рівнянь тео-

рії довгохвильових флуктуацій, одержаних у феноменологічному та мікроскопічному підходах, при співпадаючих ефективних початкових умовах до них, повинні бути ідентичними і відповідні всілякі результати та висновки, що виходять із цих рівнянь. З урахуванням останньої обставини використання розробленої процедури усереднення за випадковими початковими умовами дозволяє одержати ряд важливих результатів кінетичної та гідродинамічної теорії довгохвильових флуктуацій, які нелегко (хоча у принциповому відношенні і можливо) одержати безпосередньо із основних еволюційних рівнянь. У даній главі дисертації при допомозі такої процедури усереднення дано визначення нерівноважної ентропії для середовищ з довгохвильовими флуктуаціями, що природнім чином узагальнює загальноприйняте у звичайній кінетичній теорії визначення нерівноважної ентропії та доказано Н-теорему при наявності в системі макроскопічних флуктуацій. Знайдено вираз для локально-рівноважного розподілу (узагальнення локально-рівноважного розподілу Максвелла) у кінетичній теорії довгохвильових флуктуацій:

$$\bar{f}_1^{(0)}(\mathbf{x}; \xi) = \exp\left(\sigma \frac{\delta}{\delta \zeta}; \xi\right) f_0(\mathbf{x}; \zeta), \quad (22)$$

де $f_0(\mathbf{x}; \zeta)$ - локально-рівноважний розподіл Максвелла

$$f_0(\mathbf{x}; \zeta) = \exp(-Y_\alpha(\bar{\mathbf{x}}; \zeta) \zeta_\alpha(\bar{\mathbf{p}})), \quad (23)$$

у якому залежність термодинамічних сил $Y_\alpha(\zeta)$ від густин адитивних інтегралів руху $\zeta_\alpha(\bar{\mathbf{x}}, t)$ виражається в рівнянь

$$\int d\bar{\mathbf{p}} f_0(\mathbf{x}; \zeta) \zeta_\alpha(\bar{\mathbf{p}}) = \zeta_\alpha(\bar{\mathbf{x}}, t). \quad (24)$$

Рівняння кінетики та гідродинаміки макроскопічних флуктуацій одержано також у підході, заснованому на усередненні звичайних кінетичних рівнянь та рівнянь звичайної гідродинаміки за зовнішньою випадковою силою, що діє на систему (випадковий процес зважався гаусовим). При цьому дано просте загальне доведення теореми Фуруцу-Новікова.

Процедура усереднення за зовнішньою випадковою силою чи за випадковим розподілом початкових умов широко використовується у теорії турбулентності. Так поводяться при виведенні добре відомого у теорії турбулентності нествисливої рідини рівняння Холфа або узагальненого рівняння Холфа. Рівняння флуктуаційної гідродинаміки, одержані нами у мікроскопічному підході (або у феноменологічному підході,

основаному на усередненні за випадковими початковими умовами), у випадку нестисливої рідини переходять у рівняння Хопфа. Рівняння ж гідродинаміки макроскопічних флуктуацій, одержані усередненням за гаусовим розподілом зовнішньої випадкової сили, що діє на систему, переходять у випадку нестисливої рідини в узагальнене рівняння Хопфа. Відмічені обставини дозволяють розглядати одержані у цій дисертації рівняння флуктуаційної гідродинаміки як узагальнення рівняння Хопфа (чи узагальненого рівняння Хопфа) на випадок стисливої рідини і вважати їх з цієї причини придатними для опису турбулентних станів такої системи. При цьому одержані вирази для точних багаточастинкових функцій розподілу, що є функціоналами гідродинамічних кореляційних функцій, повинні визначати мікроскопічну структуру турбулентності у фазовому просторі. У зв'язку з цим вивчена можливість одержання спектрів турбулентності Обухова - Колмогорова, виходячи із введених у дисертації рівнянь гідродинаміки довгохвильових флуктуацій, які породжуються зовнішньою випадковою силою.

Шоста глава дисертації "Еволюція парних гідродинамічних флуктуацій" присвячена вивченню динаміки парних флуктуацій у нелінійній газодинаміці. Із причини відносно вузької області застосування результатів, одержаних при дослідженні розв'язків лінеаризованих рівнянь флуктуаційної гідродинаміки у цій главі поставлено задачу більш детального вивчення еволюції систем з макроскопічними флуктуаціями у наближенні, коли стан системи описується парними кореляційними функціями гідродинамічних величин, а впливом на динаміку системи флуктуаціями більш високого порядку можна знехтувати. З цією метою виходячи із загальних рівнянь гідродинаміки довгохвильових флуктуацій одержано нелінійні рівняння еволюції парних гідродинамічних кореляційних функцій, які у просторово - однорідному випадку стають квазілінійними. Такі ж квазілінійні рівняння одержано у наближенні, коли система описується рівнянням стану ідеального газу. Не дивлячись на те, що одержані рівняння флуктуаційної гідродинаміки значно простіші вихідних, їх розв'язок у загальному вигляді неможливий у першу чергу тому, що при цьому необхідно знати явний вигляд залежності кінетичних коефіцієнтів від гідродинамічних величин. Очевидним виходом в такої ситуації є знаходження розв'язків цих рівнянь у бездисипативному наближенні, що, в свою чергу, є досить складною задачею.

Знайдено нетривіальні стаціонарні розв'язки (граничні цикли) рів-

являє еволюції у нелінійній газодинаміці. Існування таких розв'язків обумовлене нелінійними ефектами. Показано, що при врахуванні дисипативних процесів знайдені стаціонарні розв'язки стають квазістаціонарними та встановлено часовий інтервал існування таких квазістаціонарних станів. Вивчено поведінку розв'язків рівнянь еволюції парних гідродинамічних флуктуацій у бездисипативному наближенні поблизу знайдених граничних циклів. Одержано вираз для швидкості розповсюдження флуктуацій x_{∞} , яка складним нелінійним чином залежить від граничних амплітуд цих флуктуацій:

$$\left(\frac{x_{\infty}}{x_0}\right)^2 = 8x_{\infty} \left(F(x_{\infty}) + x_{\infty} y_{\infty} F'(x_{\infty}) \right), \quad (25)$$

де $F(x)$ - функція, відома під назвою інтегралу Досона

$$F(x) = \exp(-x^2) \int_0^x dt \exp(t^2), \quad (26)$$

а величини x_{∞}, y_{∞} визначаються формулами:

$$x_{\infty} = \rho / \sqrt{2\xi_{44}^{\infty}(0)}, \quad y_{\infty} = \left(\xi_{04}^{\infty}(0) + \frac{1}{3} \xi_{11}^{\infty}(0) \right) / \varepsilon \rho, \quad (27)$$

у яких ρ - густина маси, ε - густина енергії, величини ж $\xi_{\alpha\beta}^{\infty}(0)$ представляють собою квазістаціонарні (граничні) значення парних кореляційних функцій густин адитивних інтегралів руху $\xi_{\alpha\beta}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2; t)$, узяті у точці $\bar{x}_1 = \bar{x}_2$ ($\xi_{44}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2; t)$ - кореляційна функція густин маси, $\xi_{04}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2; t)$ - кореляційна функція густини маси і густини енергії та $\xi_{ij}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2; t)$ - кореляційна функція густин імпульсу).

Вивчено питання стійкості знайдених граничних циклів. Показано, що вивчені стаціонарні стани стійкі у випадку малих амплітуд парних гідродинамічних флуктуацій і можуть губити стійкість зі збільшенням амплітуд самих граничних розв'язків. Одержані (іє залученням модельних узелів про залежність амплітуд граничних розв'язків від координат) вирази для інкрементів (декрементів) визначають характерні часи виходу систем на граничні цикли. Ці характерні часи так, як і швидкість розповсюдження пульсацій, складним чином залежать від амплітуд граничних розв'язків.

Еволюція парних гідродинамічних флуктуацій повинна завершуватись устанавленням у системі стану повної статистичної рівноваги. Поблизу рівноваги парні гідродинамічні кореляційні функції є малими і рівняння динаміки парних флуктуацій можуть бути лінеаризованими.

Однак вивчення розв'язків таких рівнянь неминуче приводить до відтворення основних результатів теорії "довгих гідродинамічних хвостів", яка досить докладно наведена у четвертій главі дисертації.

У Завершенні підсумовуються основні результати дисертації.

У Додатку на прикладі вивчення динаміки систем з гелікоїдальною магнітною структурою та одноосного двохпідградаткового антиферромагнетика продемонстровано розвинутий мікроскопічний підхід (заснований на методі скороченого опису та методі квазісередніх) до одержання рівнянь еволюції систем зі спонтанно порушеною симетрією, який у сполученні з викладеними у главі V стохастичними підходами дає надійну методику вивчення нерівноважних довгохвильових флуктуацій у вироджених системах.

Основні положення та результати, які виносяться на захист :

1. Розвинуто метод скороченого опису довгих нерівноважних флуктуацій. З допомогою коректного визначення операції згладжування прібномасштабних флуктуацій увелено параметри скороченого опису: згладжені багаточастинкові функції розподілу на флуктуаційно - кінетичному етапі еволюції та згладжені кореляційні функції густин адитивних інтегралів руху на флуктуаційно - гідродинамічному етапі еволюції. Сформульовано основні положення методу скороченого опису довгохвильових флуктуацій: принцип просторового послаблення кореляцій, функціональна гіпотеза, вирішена проблема "граничних" умов для точних (не згладжених) багаточастинкових функцій розподілу, що є універсальними функціоналами згладжених багаточастинкових функцій розподілу.

2. У мікроскопічному підході, заснованому на розвинутому методі скороченого опису, побудована загальна кінетична теорія довгохвильових флуктуацій. Одержано ланцюжки кінетичних рівнянь для згладжених багаточастинкових функцій розподілу у наближенні слабкої взаємодії між частинками або малої густини числа частинок.

3. Установлено зв'язок розвинутої кінетичної теорії макроскопічних флуктуацій із звичайною кінетичною теорією Боголюбова. Знайдено загальні вирази для точних багаточастинкових функцій розподілу та одержано загальні рівняння кінетики довгохвильових флуктуацій у термінах функціоналів одночастинкової функції розподілу кінетичної теорії Боголюбова.

4. Показано, що кінетична теорія довгих нерівноважних флуктуацій лежить в основі гідродинаміки довгохвильових флуктуацій точно так,

як звичайна кінетична теорія лежить в основі звичайної гідродинаміки. З допомогою знайдених рівнянь флуктуаційної кінетики у різних підходах, заснованих на положеннях методу скороченого опису, досліджено перехід до гідродинамічного етапу еволюції довгих флуктуацій. Одержано загальні еволюційні рівняння гідродинаміки довгохвильових флуктуацій. Розроблена процедура заміни флуктуаційно - гідродинамічних параметрів скороченого опису. Доведена інваріантність загальних рівнянь флуктуаційної гідродинаміки відносно перетворень Галілея.

5. Дана загальна стохастична інтерпретація одержаних у мікроскопічному підході рівнянь кінетичної та гідродинамічної теорії довгих флуктуацій. Таке досить загальне стохастичне виведення основних рівнянь еволюції довгохвильових флуктуацій (яке не залежить від класичної чи квантової природи систем, що вивчаються) засновано на усередненні звичайних кінетичних рівнянь чи рівнянь звичайної гідродинаміки за випадковими початковими умовами до цих рівнянь або за зовнішньою випадковою силою, що діє на систему. Показано, що рівняння флуктуаційно - гідродинамічної теорії придатні для опису турбулентних станів і є узагальненням на випадок стисливої рідини рівняння Хопфа, добре відомого у теорії турбулентності.

6. Уведено визначення нерівноважної ентропії у теорії довгохвильових флуктуацій та доведено Н-теорему. Побудовано узагальнений локально - рівноважний розподіл Максвела при наявності довгохвильових флуктуацій.

7. Розглянуто застосування розвинутої кінетичної теорії довгохвильових флуктуацій у квазілінійній теорії плазми. Показано, що виходячи з рівнянь флуктуаційної кінетики у випадку слабкої взаємодії між частинками у наближенні парних флуктуацій досить просто одержати рівняння квазілінійної теорії плазми.

8. Відтворено основні результати теорії "довгих гідродинамічних хвостів" у нормальних системах з допомогою дослідження розв'язків лінеаризованих рівнянь флуктуаційної гідродинаміки у наближенні парних флуктуацій. Використовуючи інтеграли руху для ланцюжка рівнянь ББГКІ, знайдено ефективні початкові умови до рівнянь гідродинаміки макроскопічних флуктуацій. Одержано у просторово - однорідному випадку загальний вираз для одночастинкової функції розподілу, який описує степеневий характер релаксації системи до стану статистичної рівноваги. Знайдено асимптотичний вираз для довільних гідродинамічних кореляційних функцій у просторово - неоднорідному випадку.

У підході, заснованому на використанні модифікованого на випадок середовищ із флуктуаціями методу варіації середніх Боголюбова, вивчено особливості теорії "довгих гідродинамічних хвостів" у вироджених системах на прикладі одноосного феромагнетика. Виявлено суттєве посилення ролі довгохвильових флуктуацій у системах зі спонтанно порушеною симетрією у порівнянні з такою у нормальних системах. З допомогою вибіркового підсумовування асимптотичних у часі внесків в еволюцію системи кореляторів густини сумарного магнітного моменту, одержано загальний асимптотичний вираз для кореляційних функцій довільних квазілокальних операторів у феромагнетиках типу "легка вісь".

Розвинуто заснований на методі скороченого опису та методі квазі-середніх мікроскопічний підхід до одержання рівнянь еволюції систем зі спонтанно порушеною симетрією, що дає у сполученні з розробленими стохастичними підходами методичку вивчення нерівноважних довгохвильових флуктуацій у вироджених системах.

Розвинуті стохастичні методи перспективні також при вивченні макроскопічних флуктуацій у хімічно реагуючих середовищах, процесах взаємодії частинок з поверхнею твердого тіла тощо.

9. Вивчено еволюцію парних гідродинамічних флуктуацій у нелінійній газодинаміці. Виходячи із загальних рівнянь гідродинаміки довгохвильових флуктуацій одержано нелінійні рівняння флуктуаційної гідродинаміки у наближенні парних флуктуацій, коли стан системи описується рівнянням стану ідеального газу. Виявлено нетривіальні стаціонарні розв'язки (граничні цикли) таких рівнянь у бездисипативному наближенні. Показано, що зі включенням дисипативних процесів знайдені граничні розв'язки стають квазістаціонарними та встановлено часовий інтервал існування таких квазістаціонарних станів. Одержано вираз для швидкості розповсюдження парних гідродинамічних флуктуацій, який складним чином залежить від амплітуд цих флуктуацій. Досліджено питання стійкості виявлених стаціонарних станів.

Усього по темі дисертації опубліковано 28 праць.

Основні результати дисертації опубліковано у роботах:

- 1. Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. К кинетической теории неравновесных флуктуаций / В кн.: Проблемы теории твердого тела. - Киев: Наукова думка, 1991. С. 162 - 176.
- 2. Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. К кинетической в ги-

- гидродинамической теории длинноволновых флуктуаций // ВАНТ: сер. "Ядерно - физические исследования". - 1992. - Вып. 3(24). - С. 145 - 152.
- 3. Peletminsky S.V., Slusarenko Yu.V. On theory of long wave nonequilibrium fluctuations // Physica. - 1994. - V. 210 A. - P. 165 - 204.
 - 4. Иванченко Е.А., Красильников В.В., Слюсаренко Ю.В. К теории явлений переноса в многокомпонентных квантовых системах // ФНТ. - 1996. - Т. 22, N 7. - С. 724 - 735; Low Temp. Phys. - 1996. - V. 22, N 7. - P. 556 - 564.
 - 5. Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. Метод собственных функций интеграла столкновений Больцмана в кинетической теории длинноволновых флуктуаций // ТМФ. - 1996. - Т.106, N 3. - С.469 - 488.
 - 6. Слюсаренко Ю.В. Влияние флуктуаций на гидродинамическую асимптотику функций Грина // УФЖ. - 1983. - Т. 28, N 5. - С. 774 - 780.
 - 7. Лавриненко Н.М., Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. К теории систем со спонтанно нарушенными трансляционной и спиновой симметриями // Проблемы ядерной физики и космических лучей. - Харьков: Вища школа, 1983. - Вып. 15. - С. 64 - 81.
 - 8. Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. К кинетике пространственно - неоднородных состояний одноосных ферромагнетиков // УФЖ. - 1986. - Т.31, N 9. - С. 1419 - 1427.
 - 9. Слюсаренко Ю.В. Влияние длинноволновых флуктуаций на корреляционные функции ферромагнетиков с магнитной анизотропией типа "легкая ось" // УФЖ. - 1990. - Т.35, N 3. - С. 441 - 444.
 - 10. Пелетмінський С.В., Слюсаренко Ю.В. Стохастичне виведення рівнянь кінетики та гідродинаміки довгохвильових флуктуацій // УФЖ. - 1994. - Т. 39, N 1. - С. 112 - 119.
 - 11. Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. Квазистационарные состояния в нелинейной динамике парных гидродинамических флуктуаций // Доповіді НАН України. - 1996. - N 1. - С. 23 - 28.

- 12. Бандос И.А., Коваль А.Г., Слюсаренко Ю.В. К вопросу исследования взаимодействия кислорода с поверхностью металлов методом ВИМС // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1988. - N 10. - С. 71 - 77.
- 13. Слюсаренко Ю.В., Коваль А.Г. К вопросу адсорбционно - десорбционного равновесия на поверхности твердого тела. // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1986. - N 2. - С. 32 - 38.
- 14. Слюсаренко Ю.В., Коваль А.Г., Бандос И.А. К вопросу зависимости выхода вторичных ионов от тока первичного пучка в условиях адсорбционно - десорбционного равновесия на поверхности твердого тела // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1989. - N 3. - С. 44 - 47.
- 15. Ковалевский М.Ю., Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. Термодинамика и кинетика спиральных магнитных структур и метод квазисредних // ТМФ. - 1988. - Т.74, N 2. - С. 281 - 295.
- 16. Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. К теории релаксационных процессов в антиферромагнетиках // УФЖ. - 1989. - Т. 34, N 8. - С. 1216 - 1219.
- 17. Лавриненко Н.М., Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. К кинетике систем с кристаллической структурой // ТМФ. - 1982. - Т. 53, N 3. - С. 456 - 468.
- 18. Лавриненко Н.М., Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. Гидродинамика сверхтекучей жидкости в модели со слабым взаимодействием // ФНТ. - 1983. - Т. 9, N 8. - С. 795 - 803.
- 19. Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. К кинетической теории длинных неравновесных флуктуаций I // Львов, 1992. - 25 С. - (Препринт ИФКС НАН Украины, N 92 - 5P).
- 20. Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. К кинетической теории длинноволновых гидродинамических флуктуаций II // Львов, 1992. - 32 С. - (Препринт ИФКС НАН Украины, N 92 - 6P).
- 21. Слюсаренко Ю.В. Кинетика и гидродинамика длинноволновых флуктуаций при воздействии на систему внешней случайной

См. // Харьков, 1996. - 24 С. - (Препринт ВНЦ ХФТИ, N 96 - 1).

- 22. Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. Термодинамика и кинетика систем с кристаллической структурой // Киев. 1984. - 22 С. - (Препринт ИТФ АН УССР, N 84 - 9P).
- 23. Peletminsky S.V., Slusarenko Yu.V. Kinetic and hydrodynamic theory of long wave nonequilibrium fluctuations // Proc. Intern. Conf. "Physics in Ukraine". - Kiev: Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, 1993. - P. 103 - 106.
- 24. Ковалевский М.Ю., Пелетминский С.В., Слюсаренко Ю.В. К гидродинамике магнетика с геликоидальной структурой. - III Международный симпозиум по избр. проблемам стат. механики (сборник докладов). - Дубна, ОИЯИ. - 1984. - С.365 - 374.

Питована література:

- 1. Больцман Л. Лекции по теории газов. - М.: ГИТТИ. 1953. - 556 С.
- 2. Loschmidt J. Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes, eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf Schwerkraft // Sitzber. d. Kaiserl. Acad. d. Wiss. in Wien, math. - naturwiss. classe. - 1876. - Bd. 73. - Abt. 2. - S.139; 1877. - Bd. 75. - S.67.
- 3. Zermelo E. Über einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmetheorie // Ann. Phys. - 1896. - Bd. 57. - S. 485.
- 4. Poincare H. Sur le probleme des trois corps et les equations de la dynamique // Acta Math. - 1890. - t. 13 - P. 1 - 67.
- 5. Боголюбов Н.Н. Проблемы динамической теории в статистической физике - М.-Л.: Гостехиздат, 1946. - 119 С.
- 6. Ахмедов А.И., Пелетминский С.В. Методы статистической физики. - М.: Наука, 1977. - 366 С.
- 7. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. (В 2-х частях) - М.: Наука. - Ч.1. - 1965. - 640 С.; Ч.2. - 1967. - 720 С.

- 8. Alder B.J., Wainwright T.E. Decay of Velocity Autocorrelation Functions // Phys. Rev. - 1970. - A.1. No 1. - P. 18 - 21.
- 9. Dorfman J.R., Cohen E.G.D. Velocity Correlation Function in Two - and Three Dimensions // Phys. Rev. Lett. - 1970. - V.23. No 18. - P. 1257 - 1260.
- 10. Пелетминский С.В., Соколовский А.И. Пространственная дисперсия кинетических коэффициентов жидкости вблизи равновесия // УФЖ. - 1992. - Т.37, N 11. - С. 1702 - 1711.
- 11. Гречаный О.А. Стохастическая теория необратимых процессов. - Киев: Наукова думка, 1989. - 376 С.
- 12. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. - М.: Наука. - 1990. - 316 С.

Yu.V.Slusarenko. Method of reduced description in the theory of long wave nonequilibrium fluctuations. Dissertation on scientific degree - doctor of Physics - mathematics sciences, speciality: 01.04.02 - Theoretical Physics. Institute for Single Crystals. Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, 1996.

In the dissertation the method of reduced description for systems with long wave nonequilibrium fluctuations is developed. A microscopic approach to derivation of the evolution equations of large scale fluctuations is constructed on the basis of the reduced description method. General nonlinear equations of kinetics and hydrodynamics for long wave fluctuations are obtained. The developed kinetic theory of macroscopic fluctuations is connected with usual kinetic Bogolyubov's theory. Effective initial conditions are found for the fluctuation hydrodynamic equations. Universal stochastic interpretation is given for the long wave fluctuation dynamic equations. Nonequilibrium entropy is determined and H-theorem for fluctuation media is proved. The microscopic structure of a general turbulent state is explained in the terms of long wave fluctuations. A methodics of studying evolution of long wave nonequilibrium fluctuations in systems with spontaneously broken symmetry is proposed. Some applications of the developed kinetic theory for long wave fluctuations to the theory of "long hydrodynamic tails", quasilinear plasma theory, and nonlinear gas dynamics are considered.

Ю.В.Слюсаренко. Метод сокращенного описания в теории длинноволновых неравновесных флуктуаций. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико - математических наук по специальности: 01.04.02 - теоретическая физика. Институт монокристаллов НАН Украины, Харьков, 1996.

В диссертации развит метод сокращенного описания систем с длинными неравновесными флуктуациями. На основе метода сокращенного описания разработан микроскопический подход к выводу уравнений эволюции крупномасштабных флуктуаций. Получены общие нелинейные уравнения кинетики и гидродинамики длинноволновых флуктуаций. Установлена связь развитой кинетической теории макроскопических флуктуаций с обычной кинетической теорией Боголюбова. Найдены эффективные начальные условия к уравнениям флуктуационной гидродинамики. Уравнениям динамики длинноволновых флуктуаций дана универсальная стохастическая интерпретация. Определена неравновесная энтропия и доказана H-теорема для флуктуирующих сред. В терминах длинноволновых флуктуаций выяснена микроскопическая структура общего турбулентного состояния. Предложена методика изучения эволюции длинных неравновесных флуктуаций в системах со спонтанно нарушенной симметрией. Рассмотрены некоторые приложения развитой кинетической теории длинноволновых флуктуаций в теории "длинных гидродинамических хвостов", квазилинейной теории плазмы, нелинейной газодинамике.

Ключові слова: метод скороченого опису, довгохвильові флуктуації, рівняння флуктуаційної кінетики, рівняння флуктуаційної гідродинаміки, "довгі гідродинамічні хвости", нерівноважна ентропія, нелінійна газодинаміка, турбулентність, системи зі спонтанно порушеною симетрією.

Лідписано до друку 17.10.96. Формат 60x34/16. Офсетний друк.
Умовних друкованих аркушів 1,0. Тираж 100. Замовлення №103.

Харків-108, ротاپронт ННЦ ХФТІ

44092

AB 35.947