

АНОТАЦІЯ

Грінішин О.А. Ефекти далекодії в кінетиці та гідродинаміці плазми. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія. – Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, 2021.

У дисертації вирішується важливе наукове завдання: розробка теорії гідродинамічних станів повністю іонізованої плазми з урахуванням процесів релаксації температур і швидкостей компонент в узагальненій моделі Лоренца, яка враховує ефекти далекодії.

Дослідження нерівноважних процесів є центральною задачею статистичної фізики і в нього робить вагомий внесок дисертаційна робота. Таке дослідження можливе лише на основі скороченого опису нерівноважних станів, в рамках якого система описується відносно вузьким набором параметрів – параметрів скороченого опису. Скорочений опис при цьому будується на основі рівняння Ліувілля або кінетичних рівнянь (Больцмана, Ландау тощо). Сучасною тенденцією є розширення стандартних наборів параметрів скороченого опису, з метою врахування нових ступенів свободи системи. Тут в першу чергу слід згадати опис релаксаційних процесів в вузькому розумінні цього терміну як процесів, які можуть проходити і в просторово-однорідних станах системи. Біля рівноваги ці процеси відповідають кінетичним модам системи і релаксаційним ступеням свободи. Класичні дослідження цих процесів належать Ландау, який дослідив релаксацію температур компонент плазми, і Греду, який розробив теорію максвеллівської релаксації. Ідеї цих досліджень і до теперішнього часу є робочим знаряддям новітніх досліджень. Важливим недоліком цих досліджень є відсутність у розрахунках малого параметра і розв'язання на його основі кінетичного рівняння, а також неврахування порушення локальної рівноваги в системах при наявності релаксаційних процесів. Усунення цих недоліків є актуальною задачею сучасної теорії нерівноважних процесів.

Основою сучасної теорії нерівноважних процесів вважається **метод скороченого опису** нерівноважних систем Боголюбова, в який роблять внесок дослідження дисертації. Цей метод ґрунтується на його ідеї функціональної гіпотези. На відміну від ідеї нормальних розв'язків Гільберта вона виходить з наявності у системи низки етапів природної еволюції, в яких реалізується можливість скороченого опису. Окремим випадком цього метода можна вважати метод Чепмена–Енскога, який за Боголюбовим теж базується на функціональній гіпотезі. За своїм походженням метод Чепмена–Енскога орієнтовний на дослідження стандартних гідродинамічних станів. Сучасною задачею теорії нерівноважних процесів є його узагальнення на випадок наявності в системі релаксаційних процесів в вузькому розумінні цього терміну. Центральною проблемою при цьому є дослідження просторово-однорідних станів, які не є станами локальної рівноваги. Обчислити відповідні функції розподілу не дозволяє відсутність малого параметра. Дисертаційна робота пропонує підхід до розв'язання цієї проблеми на основі кінетичного рівняння і використовує його для аналізу скороченого опису газів (зокрема, плазми). Фактично при цьому йдеться про узагальнення методів Чепмена–Енскога і Греда. В літературі зазначається актуальність цієї задачі (Singh, 2010; Jou, Casas-Vázquez, Lebon, 2010). Зокрема слід зазначити, що дослідження гідродинамічних станів плазми з урахуванням релаксаційних процесів є важливою задачею теорії нерівноважних процесів і тому їй у дисертації приділяється велика увага.

В **першому розділі** дисертації на основі кінетичного рівняння Ландау запропонована узагальнена модель Лоренца, яка на відміну від стандартної моделі розглядає іонну систему як рівноважну. Для електронної підсистеми отримано кінетичне рівняння типу Фоккера–Планка. У методі скороченого опису Боголюбова, який ґрунтується на уявленні про функціональну гіпотезу, розроблено основні рівняння гідродинаміки електронів з урахуванням процесів релаксації температури та макроскопічної швидкості, тобто кінетичних мод системи, та наявності слабкого електричного поля. Отримані рівняння аналізуються біля завершення процесів релаксації, що дає додатковий малий параметр теорії. Ос-

новне наближення за малих градієнтів гідродинамічних змінних вивчається докладно і відповідає опису релаксаційних процесів у просторово-однорідному випадку. Отримані рівняння розв'язуються наближено методом усіченого розвинення за поліномами Соніна. Коефіцієнти релаксації швидкості та температури обговорюються в наближенні одного та двох поліномів. Конкретні розрахунки коефіцієнтів релаксації проведені у наближенні одного полінома.

В другому розділі дисертаційної роботи релаксація температури та швидкості електронів повністю іонізованої просторо-однорідної плазми теж досліджується на основі узагальненої моделі Лоренца. У цій моделі на відміну від стандартної система іонів утворює рівноважну підсистему і враховується далекодія електрон-іонної взаємодії. Релаксаційні процеси в системі вивчаються на основі спектральної теорії оператора інтегралу зіткнень. Це веде до точної теорії релаксаційних процесів вирівнювання температур та швидкостей компонентів. Встановлено зв'язок розробленої теорії з методом Боголюбова скороченого опису нерівноважних систем, оскільки теорія містить доведення відповідної функціональної гіпотези, ідея якої лежить в основі методу Боголюбова. Коефіцієнти релаксації температури та швидкості як власні значення оператора інтегралу зіткнень обчислюються методом усіченого розкладення його власних функцій за ортогональними поліномами Соніна в станах далеких від завершення процесів релаксації. В цьому підході відсутній малий параметр, який дозволяє дослідити швидкість його збіжності. У підсумку коефіцієнти релаксації розраховуються в наближеннях одного та двох поліномів. Показується, що збіжність методу усіченого розвинення за поліномами Соніна повільна.

В третьому розділі дисертації досліджується релаксація густин енергії та імпульсу електронів у просторово-однорідних станах повністю іонізованої плазми за наявності малого постійного та просторово-однорідного зовнішнього електричного поля. Плазма, як і в попередніх розділах, розглядається в узагальненій моделі Лоренца, в якій на відміну від стандартної враховується далекодіюча кулонівська взаємодія електронів і іонів між собою враховується за Ландау. Кінетичне рівняння моделі лінійне і його дослідження ґрунтується на спек-

тральній теорії оператора інтегралу зіткнень. Цей оператор симетричний і позитивно визначений. Його власні вектори обираються у вигляді симетричних незвідних тензорів, які описують кінетичні моди системи. Відповідні власні значення – коефіцієнти релаксації – визначають часи релаксації системи. Встановлено, що скалярні та векторні власні функції описують еволюцію густин енергії електронів та імпульсу. Таким шляхом в цьому розділі отримується точна система лінійних рівнянь для густин енергії та імпульсу електронів, справедлива за всіх часів і без припущення про малість електричного поля. Досліджується ситуація в якій припускається, що час їх релаксації набагато більше ніж час релаксації всіх інших мод. У цьому випадку існує такий характерний час, що за більших за нього часів спостерігається скорочення в описі системи і вона повністю описується асимптотичними значеннями густин. При такому скороченому описі функція розподілу електронів залежить від часу лише через асимптотичні густини і вони задовольняють замкнутому набору рівнянь. У другому розділі результат був доведений за відсутності зовнішнього електричного поля і була знайдена точна функція нерівноважного розподілу. В третьому розділі доведено, що цей скорочений опис має місце і для малого однорідного зовнішнього електричного поля. Це можна розглядати як обґрунтування ідеї Боголюбова про функціональну гіпотезу процесів релаксації в плазмі. Доведення робиться в першому наближенні теорії збурень. Однак його ідея вірна для всіх порядків за полем. Рухливість електронів у плазмі, її провідність та явище рівноважної різниці температур електронів та іонів отримані як точні результати теорії. З огляду на попередній розділ дисертації, наближене рішення спектральної задачі обговорюється у методі усіченого розкладення власних функцій у ряди за поліномами Соніна. У наближенні одного полінома Соніна показано, що нерівноважна функція розподілу електронів біля завершення процесів релаксації може бути апроксимована функцією розподілу Максвелла. Цей результат є обґрунтуванням припущення Лоренца і Ландау в їхній теорії нерівноважних процесів у плазмі, але він показує, що їх підхід (припущення про локальну рівновагу) має обмежену точність.

В четвертому розділі дисертації повністю іонізована плазма теж досліджується в узагальненій моделі Лоренца. Гідродинаміка електронної підсистеми будується з урахуванням релаксації температур і макроскопічних швидкостей компонент та за наявності слабкого електричного поля. Градієнти гідродинамічних параметрів вважаються малими; той же малий параметр визначає малість електричного поля. Дослідження проводиться методом Чепмена–Енскога в підході Боголюбова, який ґрунтується на його уявленні про функціональну гіпотезу. Розвинута з урахуванням другого та третього розділів теорія основного наближення за градієнтами гідродинамічних змінних є точною і сформулюється в термінах власних функцій та власних значень оператора інтеграла зіткнень. Припущення про локальну рівновагу системи та близькість релаксаційних процесів до їх завершення не використовуються. Виводиться система рівнянь для внесків першого порядку за малим параметром теорії до функції розподілу електронів, яка може бути розв’язана тільки наближено. На цій основі досліджуються з точністю до першого порядку малості включно внески до дисипативних потоків та джерел в законах зміни енергії та імпульсу. Будуються та досліджуються рівняння гідродинаміки наближення ідеальної рідини. На відміну від стандартної гідродинаміки ці рівняння містять внески, які визначаються функцією розподілу електронів першого порядку за малим параметром теорії. В наближенні гідродинаміки ідеальної рідини досліджуються стаціонарні стани системи. Отримуються точні вирази для рухомості електрона і провідності системи. Досліджується розподіл температури електронної компоненти в стаціонарному стані за наявності електричного поля. Для просторово-однорідного стану отримана формула є точною.

Наукова новизна одержаних в дисертації результатів:

1. **Вперше** узагальнено модель Лоренца кінетичного рівняння повністю іонізованої плазми з метою врахування ефектів далекодії і розгляду релаксаційних процесів вирівнювання температур і швидкостей компонент.

2. Досліджено властивості інтеграла зіткнень і спектральні властивості відповідного оператора інтеграла зіткнень моделі. Досліджено моди системи і характерні часи їх еволюції.

3. В узагальненому за Боголюбовим методі Чепмена–Енскога розроблено основні співвідношення гідродинаміки електронної підсистеми плазми з урахуванням релаксаційних процесів вирівнювання температур і макроскопічних швидкостей компонент та наявності малого електричного поля для станів, близьких до завершення процесів релаксації.

4. На основі спектральної теорії оператора зіткнень **вперше** досліджено еволюцію плазми і можливість її скороченого опису густинами енергії та імпульсу або відповідними температурою і макроскопічною швидкістю електронів для станів, далеких від завершення процесів релаксації. **Вперше** показано доцільність опису мод системи незвідним поліномами.

5. **Вперше** доведено функціональну гіпотезу для скороченого опису плазми густинами енергії та імпульсу електронів за наявності однорідного зовнішнього електричного поля і припущень про часи еволюції мод плазми.

6. Для узагальненої моделі Лоренца розроблено метод наближеного розрахунку об'єктів теорії шляхом використання усічених розкладень за поліномами Соніна.

7. В рамках узагальненої моделі Лоренца **вперше** отримано точні вирази для рухливості електронів плазми, її провідності і наближено їх розраховано. Обґрунтовано ефект відмінності температур компонент рівноважної плазми за наявності зовнішнього електричного поля.

8. В узагальненому за Боголюбовим методі Чепмена–Енскога розроблено основні співвідношення гідродинаміки плазми з урахуванням релаксаційних процесів вирівнювання температур і макроскопічних швидкостей компонент за наявності малого зовнішнього електричного поля для станів, далеких від завершення процесів релаксації.

Наукове і практичне значення роботи. Використання результатів роботи.

Дисертація робить вагомий внесок в дослідження впливу релаксаційних явищ на перебіг гідродинамічних процесів. Зокрема це стосується релаксаційних процесів, далеких від їх завершення, тобто дослідження сильно нерівноважних систем.

Розробки дисертації можуть бути використані не тільки при дослідженні плазми. Врахування впливу релаксаційних процесів на явища в металах і напівпровідниках – актуальна сучасна проблема. Результати та ідеї дисертації можуть бути використані у дослідженнях, які проводяться в таких установах АН України як Інститут теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера (м. Харків), Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова (м. Київ), Інститут фізики конденсованих систем (м. Львів).

Ключові слова дисертації: повністю іонізована плазма, узагальнена модель Лоренца, метод скороченого опису Боголюбова, функціональна гіпотеза, гідродинамічні стани за наявності релаксаційних процесів, кінетичні моди, коефіцієнти релаксації, оператор інтегралу зіткнень, спектральна теорія, незвідні тензори як власні функції, поліноми Соніна, наближення одного та два поліноми, метод Чепмена–Енскога, точні розв'язки.

Список публікацій здобувача:

– в фахових виданнях категорії А, включених до міжнародної наукометричної бази «Scopus»:

1. Sokolovsky A.I., Sokolovsky S.A., Hrinishyn O.A. On relaxation processes in a completely ionized plasma // East European Journal of Physics. – 2020. – V.3. – P. 19 – 30; doi.org / 10.26565/2312-4334-2020-3-03.

– в фахових виданнях категорії Б, включених до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»:

2. Sokolovsky S.A., Sokolovsky A.I., Hrinishyn O.A. Relaxation phenomena in electron plasma of semiconductors // Journal of Physics and Electronics. – 2020. – V. 28, No. 1. – P. 17 – 24; doi.org / 10.15421/332003.

3. Sokolovsky S.A., Sokolovsky A.I., Kravchuk I.S., Grinishin O.A. Temperature and velocity relaxation in plasma. Spectral theory approach // Journal of Physics and Electronics. – 2019. – V. 27, No. 2. – P. 29-36; doi.org / 10.15421/3319/9.

4. Sokolovsky S.A., Sokolovsky A.I., Kravchuk I.S., Grinishin O.A. Relaxation processes in completely ionized plasma in generalized Lorentz model // Journal of Physics and Electronics. – 2018. – V. 26, No. 2. – P. 17-28; doi.org/10.15421/331818.

– в працях конференцій, включених до міжнародної наукометричної бази «Scopus»:

5. Sokolovsky S.A., Sokolovsky A.I., Grinishin O.A., Kravchuk I.S. Plasma hydrodynamics in the generalized Lorentz model // IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2020) (April 22-24, 2020, Kyiv, Ukraine). – Proceedings, ISBN: 978-1-7281-9713-5. – P. 284-287; doi.org /10.1109 /ELNANO50318.2020.9088834.

– які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на наукових конференціях:

6. Соколовський О.Й., Соколовський С.О., Гринішин О.А. Релаксаційні процеси у напівпровідниках //V Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2020) (м. Дніпро, 25-27 листопада 2020 р.). – Тези доповідей, ISBN 978-617-639-272-9. – P. 214-216.

7. Гринішин О.А., Кравчук І.С., Соколовський С.О., Соколовський О.Й. Порівняння наближень одного та двох поліномів у теорії релаксації в плазмі //XXII міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос» (м. Дніпро, 15-17 квітня 2020), DVD конференції, ISSN 2221-4550, Збірник тез. – С. 36.

8. Кравчук І.С., Гринішин О.А., Соколовський С.О., Соколовський О.Й. Релаксаційні процеси в плазмі в узагальненій моделі Лоренца //XXI міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос» (м. Дніпро, 10-12 квітня 2019), DVD конференції, ISSN 2221-4550, Збірник тез. – С. 46.

9. Кравчук І.С., Соколовський О.Й., Соколовський С.О., Грінішин О.А. Релаксація температур і швидкостей компонент плазми в моделі Лоренца // IV Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем» (MEICS-2019) (м. Дніпро, 27-29 листопада 2019 р.). – Тези доповідей, ISBN 978-617-639-158-6. – Р. 249-250.

10. Грінішин О.А., Кравчук І.С., Соколовський О.Й. Релаксаційні процеси в просторово-однорідній плазмі // XX міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос» (м. Дніпро, 11-13 квітня 2018), DVD конференції, ISSN 2221-4550, Збірник тез. – С.51.

11. Грінішин О.А., Кравчук І.С., Соколовський О.Й. Залежність теплопровідності плазми від температури // XX міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос» (м. Дніпро, 11-13 квітня 2018), DVD конференції, ISSN 2221-4550, Збірник тез. – С.50.

12. Hrinishin O., Kravchuk I., Sokolovsky A. On the dependence of the plasma heat conductivity on the temperature // 8th International Conference "Physics of Liquid Matter: Modern Problems" (Kyiv, Ukraine, May, 18-22, 2018). Conference DVD. Book of Abstracts. – P.56.

13. Grinishyn O., Kravchuk I., Sokolovsky A. On hydrodynamics of plasma in a generalized Lorentz model // II Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем» (MEICS-2017) (м. Дніпро, 22-24 листопада, 2017). – Тези доповідей, ISBN 978-617-639-158-6. – Р. 290–291.

14. Грінішин О.А., Кравчук І.С., Соколовський О.Й. Метод скороченого опису в кінетиці плазми // XIX міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос» (м. Дніпропетровськ, 12-14 квітня, 2017), DVD конференції, ISSN 2221-4550, Збірник тез. – С.46.

Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетної дослідної роботи кафедри теоретичної фізики «Сигнали нових важких частинок, станів матерії та процесів у зіткненнях гадронів на сучасних колайдерах високих енер-

гій» (2016-18 pp., № держреєстрації 0116U001523), «Нові стани матерії та ефективні взаємодії в експериментах на Великому гадронному колайдері» (2019-21 pp., № держреєстрації 0119U100767).

SUMMARY

Hrinishyn O.A. Effects of long-range in plasma kinetics and hydrodynamics. – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

PhD thesis for the scientific degree of Philosophy Doctor in the specialty 104 – "Physics and astronomy". – Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, 2021.

The dissertation solves important scientific task: development of theories of hydrodynamic states of complete ionized plasma taking into account the processes of temperature and velocity relaxation of plasma components in generalized Lorentz model whit account for long-range Coulomb interaction.

The study of nonequilibrium processes is a central task of statistical physics and is contributed by the dissertation. Such a study is possible only on the basis of a reduced description of nonequilibrium states, in which the system is described by a relatively small set of parameters - the parameters of the reduced description (RDP). The reduced description is based on the Liouville equation or kinetic equations (Boltzmann, Landau, etc.). The current trend is to expand the standard sets of RDPs, in order to take into account the new degrees of freedom of the system. Here, first of all, we should mention the description of relaxation processes in the narrow sense of the term as processes that can take place in spatially homogeneous states of the system. Near equilibrium, these processes correspond to the kinetic modes of the system and the relaxation degrees of freedom. Classical research of these processes belongs to Landau, who studied the relaxation of temperatures of plasma components, and Grad, who developed the theory of Maxwell's relaxation. The ideas of these studies are still a working tool for the latest research. An important disadvantage of these studies is the lack of a small parameter in the calculations and the solution of the kinetic equation based on it, as well as the disregard for violation of local

equilibrium in the systems in the presence of relaxation processes. Elimination of these shortcomings is an urgent task of modern theory of nonequilibrium processes.

The basis of the modern theory of nonequilibrium processes is the Bogolyubov **method of the reduced description** of nonequilibrium systems, to which the research of the dissertation contributes. This method is based on his idea of the functional hypothesis. In contrast to the idea of normal solutions of Hilbert, it proceeds from the existence in the system of a number of stages of natural evolution, in which the possibility of reduced description is realized. As a special case of this method can be considered the Chapman–Enskog method, which, according to Bogolyubov, is also based on the functional hypothesis. By its origin, the Chapman–Enskog method is focused on the study of standard hydrodynamic states. The modern problem of the theory of nonequilibrium processes is its generalization in the case of the presence in the system of relaxation processes in the narrow sense of this term. The central problem is the study of spatially homogeneous states that are not states of the local equilibrium. The absence of a small parameter does not allow calculating the corresponding distribution functions. The dissertation offers an approach to solving this problem based on the kinetic equation and uses it to analyze the reduced description of plasmas. In fact, this is a generalization of the methods of Chapman-Enskog and Grad. The relevance of this problem is noted in the literature (Singh, 2010; Jou, Casas-Vázquez, Lebon, 2010). It should also be noted that the study of hydrodynamic states of plasma taking into account relaxation processes is an important task of the theory of nonequilibrium processes and therefore it is given much attention in the dissertation.

In the **first section** of the dissertation, based on the Landau kinetic equation, a generalized Lorentz model is proposed, which, in contrast to the standard one, considers the ion subsystem as equilibrium. A Fokker-Planck kinetic equation is obtained for the electron subsystem. In the Bogolyubov method of the reduced description, which is based on his idea of the functional hypothesis, the basic equations of electron hydrodynamics are developed taking into account the processes of temperature and macroscopic velocity relaxation, i.e. kinetic modes of the system. The obtained

equations are analyzed at the end of relaxation processes, which gives an additional small parameter of the theory. The main approximation in small gradients of hydrodynamic variables is studied in detail and corresponds to the description of relaxation processes in the spatially homogeneous case. The obtained equations are solved approximately by the method of truncated expansion in Sonine polynomials. The velocity and temperature relaxation coefficients are discussed in the approximation of one and two polynomials. Complete calculation of relaxation coefficients were performed in the one-polynomial approximation.

In **the second section** of the dissertation, the relaxation of the electron temperature and velocity of completely ionized spatially homogeneous plasma is also investigated on the basis of the generalized Lorentz model. In this model, in contrast to the standard one of ions forms an equilibrium subsystem and the long-range electron-ion interaction is taken into account. Relaxation processes in the system are studied on the basis of the spectral theory of the collision integral operator. This leads to an accurate theory of relaxation processes of equalization of temperatures and velocities of components. The connection of the developed theory with the Bogolyubov method of the reduced description of nonequilibrium systems is established, as the theory contains proof of the corresponding functional hypothesis, the idea of which is basis of the Bogolyubov method. The coefficients of temperature and velocity relaxation as eigenvalues of the collision integral operator are calculated by the method of truncated expansion of their eigenfunctions in orthogonal Sonine polynomials in states far from the completion of relaxation processes. In this approach, there is no small parameter that allows investigating the rate of its convergence. As a result, the relaxation coefficients are calculated in the approximations of one and two polynomials. It is shown that the convergence of the truncated expansion method in Sonine polynomials is slow.

The third section of the dissertation investigates the relaxation of electron energy and momentum densities in spatially homogeneous states of completely ionized plasma in the presence of a small constant and spatially homogeneous external electric field. Plasma, as in the previous sections, is considered in the generalized Lorentz

model, in which, in contrast to the standard one, the long-range Coulomb interaction of electrons and ions is taken into account according to Landau. The kinetic equation of the model is linear and its study is based on the spectral theory of the collision integral operator. This operator is symmetric and positively defined. Its eigenvectors are chosen in the form of symmetric non-reducible tensors that describe the kinetic modes of the system. The corresponding eigenvalues (relaxation coefficients) determine the relaxation times of the system. It is established that scalar and vector eigenfunctions describe the evolution of electron energy and momentum densities. Thus, in this section an exact set of linear equations for electron energy and momentum densities, valid for all times and without assuming the smallness of the electric field is obtained. The situation in which it is assumed that the time of their relaxation is much longer than the time of relaxation of all other modes is investigated. In this case, there is such a characteristic time that at greater times there is a reduction in the description of the system and it is fully described by the asymptotic values of the densities. With such a reduced description, the electron distribution function depends on time only through asymptotic densities and they satisfy a closed set of equations. In the second section, this result is proved in the absence of an external electric field and the exact nonequilibrium distribution function is found. In the third section it is proved that this reduced description also holds for a small homogeneous external electric field. This can be considered as a substantiation of the Bogolyubov idea of the functional hypothesis for relaxation processes in plasma. The proof is made in the first approximation of the perturbation theory. However, his idea is true for all orders in the field. The mobility of electrons in the plasma, its conductivity and the phenomenon of the equilibrium temperature difference of electrons and ions are obtained as exact results of the theory. Given the previous section of the dissertation, the approximate solution of the spectral problem in the method of truncated expansion of eigenfunctions into series in the Sonine polynomials is applied in the third section too. In the approximation of one Sonine polynomial, it is shown that the nonequilibrium electron distribution function at the end of relaxation processes can be approximated by the Maxwell distribution function. This result substantiates the Lorentz and Landau assumptions in

their theory of nonequilibrium processes in plasma, but it shows that their approach (local equilibrium assumptions) has limited accuracy.

In **the fourth section** of the dissertation completely ionized plasma is also investigated in a generalized Lorentz model. The hydrodynamics of the electron subsystem is built taking into account the relaxation of temperatures and macroscopic velocities of the components and in the presence of a weak electric field. Gradients of hydrodynamic parameters are considered small; the same small parameter determines the smallness of the electric field. The study is conducted by the Chapman–Enskog method in the Bogolyubov approach, which is based on his idea of the functional hypothesis. Developed taking into account the second and third sections, the theory of the basic approximation in gradients of hydrodynamic variables is exact and formulated in terms of eigenfunctions and eigenvalues of the collision integral operator. Assumptions about the local equilibrium of the system and the proximity of relaxation processes to their completion are not used. A set of equations for the contributions of the first order in the small parameter of the theory to the electron distribution function is obtained, which can be solved only approximately. On this basis, the contributions to dissipative fluxes and sources in the laws of change of energy and momentum are investigated up to the first order of smallness included. The equations of hydrodynamics of the ideal liquid approximation are constructed and investigated. In contrast to standard hydrodynamics, these equations contain contributions that are determined by the electron distribution function of the first order in small parameter of the theory. In the approximation of the hydrodynamics of ideal liquid, the steady states of the system are investigated. Exact expressions for electron mobility and system conductivity are obtained. The temperature distribution of the electron component in the steady state in the presence of an electric field is investigated. For a spatially homogeneous state the obtained formula is exact.

Scientific novelty of the results obtained in the dissertation:

1. **For the first time**, the Lorentz model of the kinetic equation of fully ionized plasma is generalized in order to take into account the effects of long-range Coulomb electron-ion interaction and For the first time, the Lorentz model of the kinetic equa-

tion of a fully ionized plasma is generalized in order to take into account the effects of long-range and consider the relaxation processes of equalization of temperatures and velocities of components.

2. The properties of the collision integral and the spectral properties of the corresponding collision integral operator of the model are investigated. The modes of the system and the characteristic times of their evolution are studied.

3. In the Chapman–Enskog method generalized by Bogolyubov, the basic relations of hydrodynamics of the electron plasma subsystem are developed taking into account relaxation processes of temperatures and macroscopic velocities of components equalization at their completion and the presence of a small electric field.

4. On the basis of the spectral theory of the collision integral operator, the evolution of plasma and the possibility of its reduced description by energy and momentum densities or the corresponding temperature and macroscopic velocity of electrons for states far from the completion of relaxation processes are studied **for the first time. For the first time**, the expediency of describing the modes of a system by irreducible polynomials is shown.

5. **For the first time**, a functional hypothesis for the reduced description of plasma by electron energy and momentum densities in the presence of a constant homogeneous external electric field and assumptions about the times of evolution of plasma modes is proved.

6. Method for the approximate calculation of objects of theory by using truncated expansions in Sonine polynomials has been developed for the generalized Lorentz model.

7. Within the framework of the generalized Lorentz model, **for the first time** exact expressions for the mobility of plasma electrons, its conductivity were obtained and calculated approximately. The effect of temperature difference of the components of the equilibrium plasma is substantiated in the presence of external electric field.

8. In the Chapman–Enskog method generalized by Bogolyubov the basic equations of plasma hydrodynamics taking into account the relaxation processes of temperatures and macroscopic velocities of components equalization in the presence of a

small external electric field for states far from the completion of relaxation processes are developed.

Scientific and practical significance of the work. Application of the results of the investigations.

The dissertation makes a significant contribution to the study of the influence of relaxation phenomena on the course of hydrodynamic processes. In particular, this concerns to relaxation processes that are far from the completion, i.e. the study of strong nonequilibrium systems.

The dissertation developments can be used not only in the study of plasma. Taking into account the influence of relaxation processes on phenomena in metals and semiconductors is an urgent modern problem. The results and ideas of the dissertation can be used in research conducted in such institutions of the Academy of Sciences of Ukraine as O.I. Akhiezer Institute of Theoretical Physics (Kharkiv), M.M. Bogolyubov Institute of Theoretical Physics (Kyiv), and Institute of Condensed Matter Physics (Lviv).

Key words of the dissertation: fully ionized plasma, generalized Lorentz model, the Bogolyubov reduced description method, functional hypothesis, hydrodynamic states in the presence of relaxation processes, kinetic modes, relaxation coefficients, collision integral operator, spectral theory, irreducible tensors as eigenfunctions, Sonine polynomials, approximation of one and two polynomials, Chapman–Enskog method, exact solutions.

List of applicant's publications:

– *in professional publications of category A, included in the international scientometric database "Scopus":*

1. Sokolovsky A.I., Sokolovsky S.A., Hrinishyn O.A. On relaxation processes in a completely ionized plasma // East European Journal of Physics. – 2020. – V.3. – P. 19-30; doi.org / 10.26565/2312-4334-2020-3-03.

– *in professional publications of category B, included in the international scientometric database "Index Copernicus":*

2. Sokolovsky S.A., Sokolovsky A.I., Hrinishyn O.A. Relaxation phenomena in electron plasma of semiconductors // Journal of Physics and Electronics. – 2020. – V. 28, No. 1. – P. 17 – 24; doi.org / 10.15421/332003.

3. Sokolovsky S.A., Sokolovsky A.I., Kravchuk I.S., Grinishin O.A. Temperature and velocity relaxation in plasma. Spectral theory approach // Journal of Physics and Electronics. – 2019. – V. 27, No. 2. – P. 29-36; doi.org / 10.15421/3319/9.

4. Sokolovsky S.A., Sokolovsky A.I., Kravchuk I.S., Grinishin O.A. Relaxation processes in completely ionized plasma in generalized Lorentz model // Journal of Physics and Electronics. – 2018. – V. 26, No. 2. – P. 17-28; doi.org/10.15421/331818.

– in the proceedings of conferences included in the international scientometric database "Scopus":

5. Sokolovsky S.A., Sokolovsky A.I., Hrinishyn O.A., Kravchuk I.S. Plasma hydrodynamics in the generalized Lorentz model // IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2020) (April 22-24, 2020, Kyiv, Ukraine). – Proceedings, ISBN: 978-1-7281-9712-8, IEEE Catalog Number: CFP2005U-USB. – P. 284-287.

– certifying the approbation of the dissertation materials at scientific conferences:

6. Sokolovsky O.Y., Sokolovsky S.O., Grinishin O.A. Relaxation processes in semiconductors // V All-Ukrainian Research-practice Conference "Promising trends of modern electronics, informational and computer systems" (MEICS-2020) (Dnipro, November 25-27, 2020). - Abstracts, ISBN 978-617-639-272-9. - P. 214-216.

7. Grinishin O.A., Kravchuk I.S., Sokolovsky S.O., Sokolovsky O.Y. Comparison of approximations of one and two polynomials in the theory of relaxation in plasma // XXII International Youth Scientific and Practical Conference "Human and Space" (Dnipro, April 15-17, 2020), DVD conference, ISSN 2221-4550, Abstract Book. – P. 36.

8. Kravchuk I.S., Grinishin O.A., Sokolovsky S.O., Sokolovsky O.Y. Relaxation processes in plasma in the generalized Lorentz model // XXI International Youth

Scientific and Practical Conference "Human and Space" (Dnipro, April 10-12, 2019), DVD conference, ISSN 2221-4550, Abstract Book. – P. 46.

9. Kravchuk I.S., Sokolovsky O.Y., Sokolovsky S.O., Grinishin O.A. Relaxation of temperatures and velocities of plasma components in the Lorentz model // IV All-Ukrainian Research-practice Conference "Promising trends of modern electronics, informational and computer systems" (MEICS-2019) (Dnipro, November 27-29, 2019). – Abstracts, ISBN 978-617-639-158-6. – P. 249-250.

10. Grinishin O.A., Kravchuk I.S., Sokolovsky O.Y. Relaxation processes in spatially homogeneous plasma // XX International Youth Scientific and Practical Conference "Human and Space" (Dnipro, April 11-13, 2018), DVD conference, ISSN 2221-4550, Abstract Book. – P.51.

11. Grinishin O.A., Kravchuk I.S., Sokolovsky O.Y. Dependence of plasma thermal conductivity on temperature // XX International Youth Scientific and Practical Conference "Human and Space" (Dnipro, April 11-13, 2018), DVD conference, ISSN 2221-4550, Abstract Book. – P.50.

12. Hrinishin O., Kravchuk I., Sokolovsky A. On the dependence of the plasma heat conductivity on the temperature // 8th International Conference "Physics of Liquid Matter: Modern Problems" (Kyiv, Ukraine, May, 18-22, 2018). Conference DVD. Book of Abstracts. – P.56.

13. Grinishyn O., Kravchuk I., Sokolovsky A. On hydrodynamics of plasma in a generalized Lorentz model // II All-Ukrainian Research-practice Conference "Promising trends of modern electronics, informational and computer systems" (MEICS-2017) (Dnipro, November 22-24, 2017). – Abstracts, ISBN 978-617-639-158-6. – P. 290-291.

14. Grinishin O.A., Kravchuk I.S., Sokolovsky O.Y. The method of reduced description in plasma kinetics // XIX International Youth Scientific and Practical Conference "Human and Space" (Dnepropetrovsk, April 12-14, 2017), DVD conference, ISSN 2221-4550, Collection of abstracts. – P.46.

The thesis was performed within the framework of the state budget research work of the Department of Theoretical Physics "Signals of new heavy particles, states of matter and processes in hadron collisions on modern high-energy colliders" (2016-18, state registration 0116U001523), "New states of matter and effective interactions in experiments on the Large Hadron Collider" (2019-21, № state registration 0119U100767).