

**Національна академія наук України
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова**

Семенов Ігор Львович

УДК 533.9, 533.7

**ВПЛИВ ЗІТКНЕНЬ НА ЕКРАНУВАННЯ МАКРОЧАСТИНОК
В СЛАБКОІОНІЗОВАНІЙ ПЛАЗМІ**

01.04.02 – теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, академік НАН України, професор

Загородній Анатолій Глібович,

Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, завідувач відділу теорії та моделювання плазмових процесів, директор

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, професор

Томчук Петро Михайлович, Інститут фізики НАН України, завідувач відділу теоретичної фізики

доктор фізико-математичних наук, професор

Токарчук Михайло Васильович, Інститут фізики конденсованих систем НАН України, завідувач відділу теорії нерівноважних процесів

Захист відбудеться « 24 » жовтня 2013 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної Академії Наук України за адресою: вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03680, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної Академії Наук України за адресою: вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03680, Україна.

Автореферат розісланий « 20 » вересня 2013 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01,
доктор фіз.-мат. наук

В. Є. Кузьмичев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Вивчення процесів взаємодії плазми з макрочастинками є однією із важливих проблем сучасної фізики плазми. В останні роки цій проблемі приділяється значна увага у зв'язку із стрімким розвитком досліджень запорошеної (комплексної) плазми – іонізованого газу, якій містять заряджені частинки конденсованої дисперсної фази. Фізика запорошеної плазми є відносно новою галуззю науки, розвиток якої має як фундаментальне, так і прикладне значення. Дослідження властивостей запорошеної плазми є важливими для пояснення багатьох астрофізичних і атмосферних явищ. Наприклад, пилові структури присутні в хмарах міжзоряного газу, хвостах комет, планетарних кільцях, навколоземній іоносфері. Велике значення має вирішення технологічних проблем, які пов'язані із утворенням частинок конденсованої фази в установках керованого термоядерного синтезу та при лазерно-дуговому зварюванні металів. Ще одним важливим напрямом є дослідження взаємодії плазми з макрочастинками в процесах плазмової обробки матеріалів. Такі дослідження мають значення для розвитку сучасних плазмових технологій, які активно використовуються в мікроелектроніці, при виробництві наночастинок та нанесенні покриттів. Окремий інтерес викликають дослідження упорядкованих структур (плазмово-пилових кристалів) в запорошеній плазмі. Відносна простота візуалізації таких структур дозволяє вивчати фазові переходи та розповсюдження низькочастотних коливань в кристалічних структурах на макроскопічному рівні.

У зв'язку із розвитком лабораторних досліджень запорошеної плазми, особлива увага приділяється вивченню процесів заряджання та екранування макрочастинок у слабоіонізованій плазмі. Для пояснення багатьох властивостей запорошеної плазми важливим є теоретичне визначення таких параметрів, як електричний заряд та потенціал макрочастинок в плазмі, а також сила опору, що діє на макрочастинку при її обтіканні плазмою. Відомо, що одним із найбільш важливих чинників, які впливають на характеристики процесів заряджання та екранування макрочастинок в слабоіонізованій плазмі, є зіткнення іонів та електронів з нейтральною компонентною плазми (зокрема, особливу роль відіграють зіткнення іон-нейтрал). При цьому більшість існуючих моделей описує процеси заряджання та екранування макрочастинок лише у двох граничних випадках: коли довжини вільного пробігу іонів та електронів в плазмі є набагато більшими та набагато меншими за довжину Дебая. Особливості цих процесів у проміжному режимі зіткнень, коли довжина вільного пробігу для зіткнень іон-нейтрал є одного порядку із довжиною Дебая, на даний час вивчено недостатньо. Зокрема залишаються не до кінця з'ясованими питання про залежність заряду частинки та сили опору з боку плазми від частоти зіткнень іон-нейтрал, а також питання про асимптотичну поведінку потенціалу частинок в проміжному режимі зіткнень. Окрім цього, недостатньо вивченим є вплив зіткнень на процеси взаємодії макрочастинок із плазмою у випадку, коли розмір частинок є одного порядку із довжиною Дебая. Таким чином, актуальність проблеми, яку було розглянуто у даній дисертаційній роботі, визначається необхідністю більш детальних досліджень впливу зіткнень на основні характеристики процесів заряджання та екранування макрочастинок в слабоіонізованій плазмі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Результати, які увійшли до дисертаційної роботи, були отримані в рамках планової наукової тематики відділу теорії та моделювання плазмових процесів Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України (проект за конкурсом НАН України – РФФД «Формування нелінійних структур і розповсюдження хвиль в запорошеній плазмі» 2007 – 2011 рр., шифр 1.4.8.1, номер державної реєстрації в УкрІНТЕІ РК 0110U000987; тема «Транспортні процеси та формування структур у плазмових системах» 2008 – 2012 рр., шифр 1.4.8.1, номер державної реєстрації в УкрІНТЕІ РК 0107U007871; проект за конкурсом НАН України – РФФД «Дослідження рівноважних і кінетичних властивостей мікроскопічної кулонівської моделі речовини» 2012 – 2013 рр., шифр 1.4.8.1, номер державної реєстрації в УкрІНТЕІ РК 0112U003479; тема «Мікроскопічні та феноменологічні моделі фундаментальних фізичних процесів у мікро- та макросвіті» 2012 – 2016 рр., шифри 1.4.1, 1.4.2, 1.4.5, 1.4.7, 1.4.8, 1.4.9, номер державної реєстрації в УкрІНТЕІ РК 0112U000056).

Мета і задачі дослідження

Метою досліджень є аналіз впливу зіткнень між компонентами слабоіонізованої плазми на процеси заряджання та екранування макрочастинок. Для досягнення поставленої мети треба вирішити такі *задачі*:

- проаналізувати та вдосконалити існуючі моделі для опису зіткнень між компонентами частково іонізованої плазми; розробити метод чисельного розв'язку самоузгодженої системи модельних кінетичних рівнянь для компонент плазми у випадках сферичної та аксіальної симетрії та створити програмне забезпечення для комп'ютерної реалізації даного методу на багатопроцесорних обчислювальних системах;
- дослідити процеси заряджання та екранування макрочастинок в слабоіонізованій плазмі на основі чисельного розв'язку системи модельних кінетичних рівнянь; для випадків термічної та неізотермічної плазми визначити залежність заряду частинки від довжини вільного пробігу для зіткнень іон-нейтрал, отримати розподіли електричного потенціалу і макроскопічних параметрів плазми навколо частинки в широкому діапазоні режимів зіткнень;
- провести чисельне дослідження процесу динамічного екранування макрочастинок в слабоіонізованій плазмі; вивчити вплив зіткнень іон-нейтрал на силу опору з боку іонів (іонна сила опору); проаналізувати залежність іонної сили опору від швидкості потоку плазми для різних режимів зіткнень; визначити відношення сили опору з боку іонів до сили опору з боку нейтральної компоненти плазми в сильнозіткневному (гідродинамічному) режимі.

Об'єктом дослідження є процеси заряджання та екранування макрочастинок в слабоіонізованій плазмі.

Предметом дослідження є заряд макрочастинок, розподіли електричного потенціалу та макроскопічних параметрів плазми навколо макрочастинок, сили опору, які діють на макрочастинок з боку різних компонент плазми.

Методами дослідження є методи кінетичної теорії плазми, методи теорії розріджених газів, методи чисельного розв'язку систем гіперболічних рівнянь, методи теорії паралельних обчислень.

Наукова новизна одержаних результатів

- Запропоновано новий підхід до моделювання процесів взаємодії плазми з макрочастинками, який базується на прямому чисельному розв'язку самоузгодженої системи модельних кінетичних рівнянь. Розроблено новий тип модельних інтегралів зіткнень для опису зіткнень в частково іонізованій плазмі. Створено метод чисельного розв'язку кінетичних рівнянь у випадку сферичної та аксіальної симетрії.
- Вперше визначено залежність заряду макрочастинок від довжини вільного пробігу для зіткнень іон-нейтрал у випадку, коли розмір частинок є одного порядку із довжиною Дебая в плазмі.
- Вперше проведено чисельний аналіз розподілів електричного потенціалу та макроскопічних параметрів плазми навколо макрочастинок у випадку, коли довжина вільного пробігу для зіткнень іон-нейтрал та розмір частинки є одного порядку із довжиною Дебая в плазмі.
- Запропоновано модифікацію відомого аналітичного підходу до обчислення іонної сили опору в беззіткневій плазмі (теорія парних зіткнень), яка дозволяє визначити іонну силу опору у випадку, коли розмір макрочастинок є одного порядку із довжиною Дебая в плазмі.
- Вперше проведено аналіз залежності сили опору з боку іонів від довжини вільного пробігу для зіткнень іон-нейтрал.
- Проведено аналіз залежності іонної сили опору від швидкості потоку плазми в сильнозіткневому режимі. Отримано нові дані щодо співвідношення між силою опору з боку іонів та силою опору з боку нейтральної компоненти плазми в гідродинамічному режимі.

Практичне значення одержаних результатів

Результати, отримані в дисертаційній роботі, є внеском у теоретичний опис процесів взаємодії слабкоіонізованої плазми з макрочастинками. Вони можуть бути використані для пояснення властивостей плазово-пилових структур в запорошеній плазмі та вирішення ряду технологічних проблем. Зокрема отримані результати можуть бути застосовані для розробки методів усунення пилових частинок та частинок конденсованої фази, які мають негативний вплив на технологічні характеристики процесів плазової обробки матеріалів та лазерно-дугового зварювання металів.

Крім цього, розроблені методи чисельного розв'язку самоузгодженої системи кінетичних рівнянь та створене програмне забезпечення для їх комп'ютерної реалізації на багатопроесорних обчислювальних системах можуть бути застосовані для моделювання широкого кола нерівноважних процесів в плазмі. Зокрема цей підхід може бути використаний для моделювання взаємодії пилових частинок із плазмою в установках керованого термоядерного синтезу, моделювання взаємодії плазми із електродами в газовому розряді та моделювання теплової взаємодії плазми з частинками в процесах плазового напилення.

Особистий внесок здобувача

В роботі [1] автором розроблено метод чисельного розв'язку самоузгодженої системи кінетичних рівнянь у випадку сферичної симетрії, запропоновано алгоритм застосування цього методу на багатопроесорних обчислювальних системах та про-

ведено чисельне дослідження процесу екранування макрочастинок в термічній плазмі аргону.

В роботі [2] автором запропоновано нову модель для опису зіткнень в частково іонізованій плазмі та проведено чисельне дослідження кінетики заряджання макрочастинок в термічній плазмі аргону.

В роботі [3] автором проведено чисельне дослідження процесів заряджання та екранування макрочастинок в неізотермічній плазмі аргону.

В роботі [4] автором розроблено метод чисельного розв'язку самоузгодженої системи кінетичних рівнянь у випадку аксіальної симетрії, запропоновано алгоритм застосування цього методу на багатопроекторних обчислювальних системах та проведено чисельний аналіз динамічного екранування макрочастинок в плазмі аргону.

Робота [5] виконана автором одноосібно.

Апробація результатів дисертації

Матеріали дисертації доповідались на таких конференціях: III International Conference "Dusty Plasmas in Applications", 25-29 серпня 2010 р., Одеса, Україна; 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics/16th International Congress on Plasma Physics, 2-6 July 2012, Stockholm, Sweden; International Conference «Problems of Theoretical Physics» dedicated to Alexander Davydov 100th birthday, 8-11 October 2012, Kyiv, Ukraine. Робота також обговорювалася на наукових семінарах відділу теорії та моделювання плазових процесів Інституту теоретичної фізики НАН України ім. М. М. Боголюбова.

Публікації

За матеріалами дисертації опубліковано 5 статей у провідних наукових фахових виданнях [1, 2, 3, 4, 5]. Основні результати дисертації додатково висвітлено у матеріалах конференцій [6, 7, 8].

Структура дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 133 найменування. Робота написана на 126 сторінках машинописного тексту, містить 30 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі наведено огляд існуючих підходів та методів, які застосовуються для теоретичного опису процесів взаємодії слабкоіонізованої плазми з макрочастинками. Описано класифікацію існуючих моделей в залежності від співвідношення між довжиною Дебая (r_D) в плазмі та довжинами вільного пробігу для іон-атомних (l_{ia}) та електрон-атомних (l_{ea}) зіткнень. Стисло розглянуто основні властивості процесів заряджання та екранування макрочастинок в різних режимах зіткнень: беззіткневого ($l_{ia}, l_{ea} \gg r_D$), сильнозіткневого ($l_{ia}, l_{ea} \ll r_D$) та проміжному

($l_{ia} \sim r_D$). Також розглянуто питання, які є недостатньо вивченими та потребують більш детальних досліджень.

У *другому розділі* запропоновано новий підхід до моделювання процесів взаємодії плазми з макрочастинками, який базується на прямому чисельному розв'язку самоузгодженої системи кінетичних рівнянь Власова з модельними інтегралами зіткнень (рівняння Власова-Бхатнагара-Гросса-Крука або Власова-БГК).

Проведено порівняльний аналіз існуючих моделей для опису зіткнень в багатокомпонентних газових та плазмових сумішах. Запропоновано нову модель, згідно з якою інтеграл зіткнень між компонентами α та β має форму

$$J_{\alpha\beta}(t, \vec{r}, \vec{\xi}) = \nu_1 n_\beta (M_\alpha^1 - f_\alpha) + \nu_2 n_\beta (M_\alpha^2 - f_\alpha), \quad (1)$$

де $f_\alpha(t, \vec{r}, \vec{\xi})$ це функція розподілу частинок α ; $\nu_{1,2}$ це коефіцієнти, які визначають частоту зіткнень; $M_\alpha^{1,2}$ це локально рівноважні функції розподілу, які певним чином залежать від мас $m_{\alpha,\beta}$, концентрацій $n_{\alpha,\beta}(t, \vec{r})$, макроскопічних швидкостей $\vec{u}_{\alpha,\beta}(t, \vec{r})$ та температур $T_{\alpha,\beta}(t, \vec{r})$ частинок α і β , відповідно. Дані функції мають вигляд

$$M_\alpha^1 = n_\alpha (m_\alpha / 2\pi k \hat{T}_\alpha)^{3/2} \exp \left[-m_\alpha (\vec{\xi} - \vec{u}_{\alpha\beta})^2 / 2k \hat{T}_\alpha \right],$$

$$M_\alpha^2 = n_\alpha (m_\alpha / 2\pi k T_{\alpha\beta})^{3/2} \exp \left[-m_\alpha (\vec{\xi} - \vec{u}_\alpha)^2 / 2k T_{\alpha\beta} \right],$$

де

$$\vec{u}_{\alpha\beta} = (m_\alpha \vec{u}_\alpha + m_\beta \vec{u}_\beta) / (m_\alpha + m_\beta); 3k \hat{T}_\alpha = 3k T_\alpha + m_\alpha (\vec{u}_{\alpha\beta} - \vec{u}_\alpha)^2; T_{\alpha\beta} = (T_\alpha + T_\beta) / 2.$$

Коефіцієнти ν_1 та ν_2 зв'язані між собою співвідношенням $\nu_2 = 4\nu_1 m_\alpha m_\beta / (m_\alpha + m_\beta)^2$. Показано, що для модельних інтегралів (1) виконуються усі основні властивості повних інтегралів зіткнень Больцмана: закони збереження, нерівності Больцмана (Н-теорема); відомі співвідношення для швидкості зміни імпульсу та енергії компонент суміші за рахунок зіткнень (перші моменти від інтегралів зіткнень). Перевагою розробленої моделі є те, що вона дозволяє більш детально описати процес релаксації плазми до стану термодинамічної рівноваги на мікроскопічному рівні.

Розроблено методи чисельного розв'язку системи модельних кінетичних рівнянь у випадках сферичної та аксіальної симетрії. Дані методи базуються на розщепленні кінетичних рівнянь за фізичним процесами. У випадку сферичної симетрії кінетичні рівняння розв'язуються у координатах (r, ξ, ω) , де r це відстань від центру симетрії, $\xi \cos \omega$ це радіальна швидкість, а $\xi \sin \omega$ це абсолютна величина поперечної швидкості. Схема розщеплення має вигляд

$$\left\{ \partial_t + \partial_r r \xi \cos \omega - r^{-1} \partial_\omega \xi \sin \omega \right\} f_\alpha = J_\alpha,$$

$$\left\{ \partial_t - (q_\alpha / m_\alpha) \partial_r \varphi \xi^{-1} (\partial_\xi \xi \cos \omega - \partial_\omega \sin \omega) \right\} f_\alpha = 0,$$

де φ це потенціал самоузгодженого електричного поля; q_α це заряд частинок; J_α це модельний інтеграл зіткнень. У випадку аксіальної симетрії кінетичні рівняння розв'язуються у координатах $(r, x, \xi_x, \xi, \omega)$, де x це координата вздовж вісі симетрії, r це відстань від вісі симетрії, ξ_x це швидкість вздовж вісі x , а $\xi \cos \omega$ та $\xi \sin \omega$ це радіальна та азимутальна швидкості, відповідно. Схема розщеплення має вигляд

$$\begin{aligned} \{\partial_t + \xi_x \partial_x + \xi \cos \omega \partial_r\} f_\alpha &= 0, \\ \{\partial_t - r^{-1} \xi \sin \omega \partial_\omega - (q_\alpha / m_\alpha) (\partial_x \varphi \partial_{\xi_x} + \partial_r \varphi \partial_{\xi_r})\} f_\alpha &= 0, \\ \partial_t f_\alpha &= J_\alpha, \end{aligned}$$

де $\partial_{\xi_r} = \cos \omega \partial_\xi - \xi^{-1} \sin \omega \partial_\omega$. Для чисельної апроксимації гіперболічних операторів в кінетичних рівняннях використовуються відомі скінчено-об'ємні схеми високого порядку точності (MUSCL schemes), а для апроксимації модельних інтегралів зіткнень використовується явна чи явно-неявна схема Ейлера. Рівняння Пуассона для самоузгодженого електричного поля розв'язується чисельно за допомогою теореми Гауса у випадку сферичної симетрії та методом скінчених елементів у випадку аксіальної симетрії. Також описано способи застосування розроблених чисельних методів на багатопроцесорних обчислювальних системах.

У третьому розділі подано результати чисельного дослідження процесів заряджання та екранування сферичної макрочастинки в слабкоіонізованій плазмі аргону, яке проводилося на основі розв'язку сферично-симетричної системи кінетичних рівнянь Власова-БГК. Розглянуто два типових випадку: заряджання частинки в неізотермічній плазмі газового розряду низького тиску та в ізотермічній плазмі, яка знаходиться у стані іонізаційної рівноваги. Параметри плазми обираються таким чином, що число Кнудсена для іон-атомних зіткнень l_{ia}/r_D змінюється в широкому діапазоні від 10^{-3} до 10^2 . При цьому довжина Дебая в плазмі складає приблизно 100 мкм в першому випадку та 5–7 мкм в другому. Враховуючи типові розміри макрочастинок в запорошеній плазмі ($a = 1–10$ мкм), можна бачити, що випадок $a \sim r_D$ реалізується для типових умов в ізотермічній плазмі, а умова $a \ll r_D$ реалізується в неізотермічній плазмі газового розряду, коли температура електронів T_{e0} набагато перевищує температуру іонів T_{i0} . В обох випадках частинка набуває від'ємного заряду за рахунок поглинання іонів та електронів з оточуючої плазми.

Вивчено залежність заряду макрочастинок (q) від числа Кнудсена для іон-атомних зіткнень. У випадку $a \ll r_D$ дана залежність може бути визначена на основі відомих аналітичних моделей: модель Хадчісона, модель Д'ячкова, модель Зобніна, інтерполяція Храпака-Морфілла (ХМ). Шляхом порівняння результатів, отриманих за допомогою вказаних моделей, із результатами, які було отримано на основі розв'язку кінетичних рівнянь, показано, що найбільш точною є інтерполяційна формула Храпака-Морфілла (рис. 1). Поведінка заряду в проміжному режимі є немонотонною. Заряд набуває мінімального значення при $l_{ia} \sim a$, що пов'язано із немонотонною поведінкою іонного струму. У випадку $a \sim r_D$ залежність заряду від числа Кнудсена також має мінімум при $l_{ia} \sim a$ (рис. 2). При $l_{ia}/r_D \rightarrow \infty$ для обчислення заряду можна використовувати нелінійну беззіткневу модель Бистренко (Т. Bystrenko, А. Zagorodny // Physics Letters A – 2002. – Vol. 299, № 4. – Р. 383). В сильнозіткнево-му режимі заряд частинки є лінійною функцією від $\ln(l_{ia}/r_D)$. Величина заряду зростає із збільшенням a/r_D . При цьому потенціал поверхні практично не змінюється. Також досліджено кінетику процесу заряджання частинки та отримано залежності заряду частинки від часу для різних режимів зіткнень. Показано, що даний процес

має дві стадії. На першій стадії заряд частинки стрімко зростає за рахунок поглинання електронів із плазми та набуває значення, яке практично дорівнює стаціонарному значенню заряду. Тривалість цієї стадії має порядок оберненої частоти плазових коливань для електронів. Протягом другої стадії відбувається асимптотичне наближення заряду до стаціонарного значення. Тривалість цієї стадії має порядок оберненої частоти плазових коливань для іонів та залежить від числа Кнудсена.

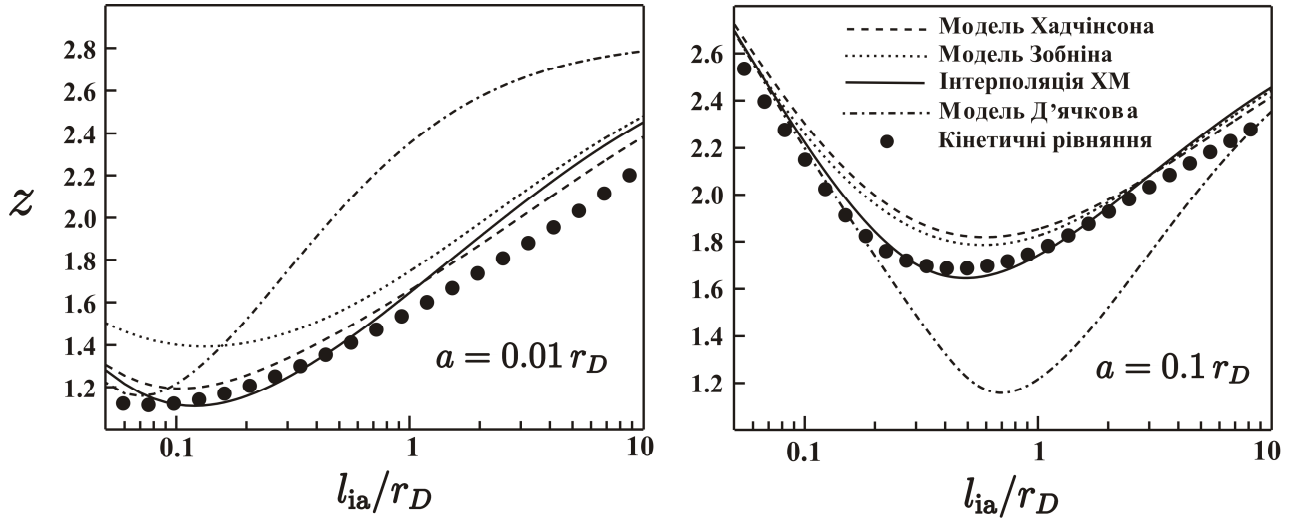


Рис. 1 Залежність нормованого заряду $z = e|q|/akT_{e0}$ від l_{ia}/r_D в неізотермічній плазмі ($T_{e0}/T_{i0} = 30$) для частинок різного розміру.

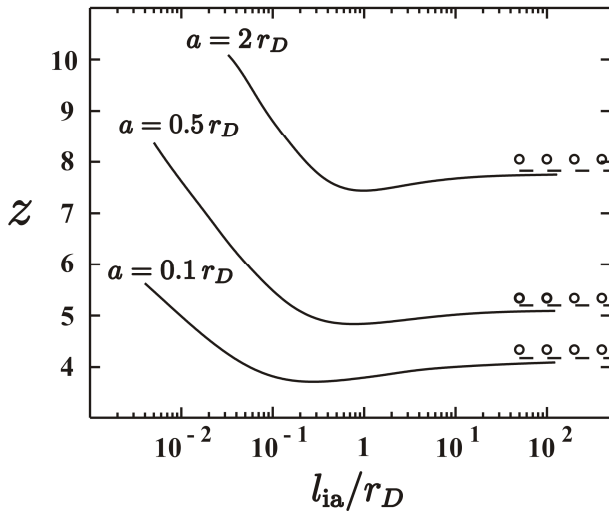


Рис. 2 Залежність нормованого заряду z від l_{ia}/r_D в ізотермічній плазмі для частинок різного розміру. Штрихована лінія показує граничне значення заряду в беззіткневій плазмі, а символи $\circ$ показують результати, отримані за допомогою відомої беззіткневої моделі Бистренко.

Проведено аналіз впливу іон-атомних зіткнень на розподіл електричного потенціалу навколо частинки. Показано, що у випадку $a \ll r_D$ розподіл електричного потенціалу в широкому діапазоні значень l_{ia}/r_D добре описується на основі відомої лінійної кінетичної моделі із точковим стоком (S. A. Khrapak, B. A. Klumov, G. E. Morfill // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 100, № 2. – P. 225003). В слабкозіткневому режимі більш точні результати можна отримати за допомогою аналогічної моделі, яка додатково враховує залежність перерізу поглинання іонів частинкою від їх швидкості (A. G. Zagorodny et al. // Ukr. J. Phys. – 2009. – Vol. 54, № 11. – P. 1089). Результати, отримані на основі вказаних моделей та розв'язку кінетичних рівнянь, свідчать про те, що потенціал частинки при $a \ll r_D$ має асимптотичну поведінку ку-

лонівського типу в широкому діапазоні режимів зіткнень. Це пов'язано із присутністю струмів заряджання поблизу частинки, які виникають внаслідок поглинання іонів та електронів на її поверхні. Шляхом аналізу розподілів повного заряду Q_r було показано, що у випадку $a \sim r_D$ потенціал частинки також має асимптотичну поведінку кулонівського типу в широкому діапазоні значень l_{ia}/r_D (рис. 3). Було встановлено, що повний заряд набуває постійного значення на великих відстанях від частинки, тобто згідно з теоремою Остроградського-Гауса потенціал електричного поля має асимптотичну поведінку r^{-1} . Асимптота потенціалу може бути записана у вигляді $\phi = \hat{q}_{\text{eff}} q/r$, де $\hat{q}_{\text{eff}}$ це відносний ефективний заряд частинки в плазмі. Величина $\hat{q}_{\text{eff}}$ визначається асимптотичним значенням нормованого повного заряду $Q^* = Q_r/q$ та залежить від числа Кнудсена l_{ia}/r_D і відношення a/r_D . Показано також (рис. 3), що у двох граничних випадках $l_{ia} \gg r_D$ та $l_{ia} \ll r_D$ результати, отримані шляхом розв'язку кінетичних рівнянь, добре узгоджуються із результатами, які можна отримати на основі відомих підходів: беззіткнева модель Бистренко та дрейфово-дифузійна модель (О. Bystrenko, A. Zagorodny // Phys. Rev. E – 2003. – Vol. 67, № 6. – P. 066403). Приведено розподіли основних макроскопічних параметрів для різних компонент плазми (концентрація, швидкість, температура) в широкому діапазоні значень l_{ia}/r_D та a/r_D . Показано, що температура іонів поблизу частинки може значно відрізнятися від температури іонів в оточуючій плазмі, а макроскопічна швидкість іонів поблизу поверхні може бути одного порядку з їх тепловою швидкістю.

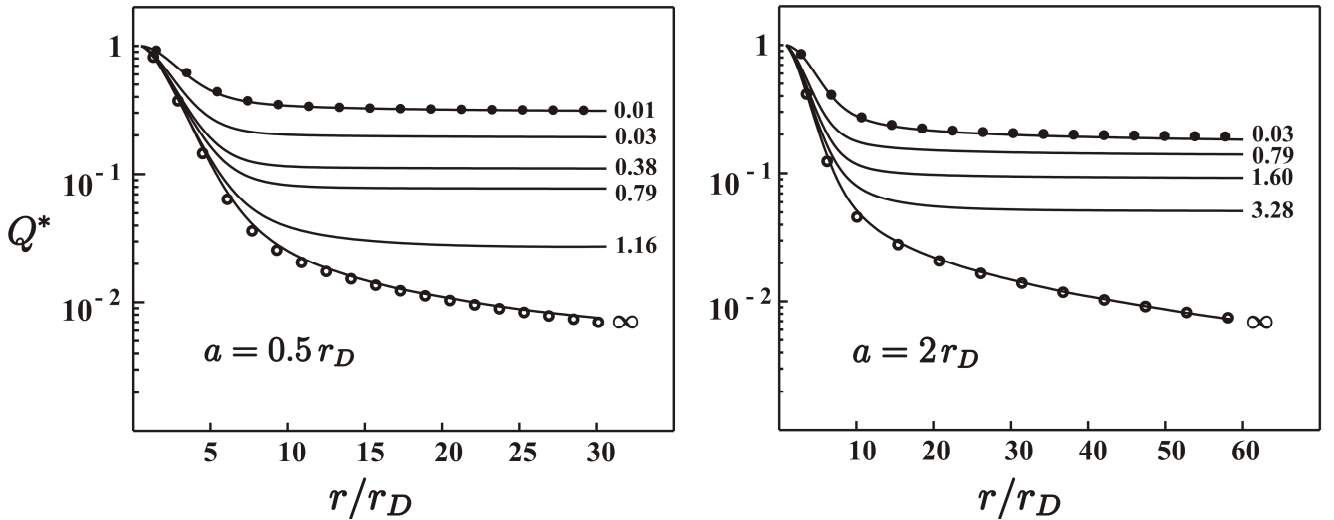


Рис. 3 Розподіли нормованого заряду $Q^* = Q_r/q$ навколо частинки в ізотермічній плазмі для різних значень l_{ia}/r_D (вказано біля кривих). Символи ● показують результати, отримані за допомогою дрейфово-дифузійної моделі, а символи ○ показують результати, отримані за допомогою беззіткневої моделі Бистренко.

У четвертому розділі описано результати дослідження процесу динамічного екранування сферичної макрочастинки, що рівномірно рухається в слабкоіонізованій плазмі аргону. Дослідження проводилося на основі чисельного розв'язку системи кінетичних рівнянь Власова-БГК в аксіально-симетричній формі. Розглянуто випадки ізотермічної та слабконеізотермічної плазми. Параметри плазми обираються таким чином, що довжина Дебая складає приблизно 5 мкм, а число Кнудсена для

іон-атомних зіткнень (l_{ia}/r_D) змінюється в широкому діапазоні від 10^{-4} до 10^2 . Вважається, що частинка є ідеальним провідником, а температура її поверхні дорівнює температурі важких частинок (іонів та атомів) в плазмі. Як і у випадку статичного екранування, частинка набуває від'ємного заряду за рахунок поглинання іонів та електронів з плазми. Основна увага приділяється обчисленню сили опору, що діє на макрочастинку з боку іонів. Іонна сила опору F_d визначається як сума двох компонент: $F_d = F_m + F_e$, де F_m виникає за рахунок механічної взаємодії іонів з частинкою, а F_e це поляризаційна складова, яка виникає внаслідок взаємодії заряду частинки із оточуючою анізотропною плазмою.

Проведено аналіз залежності іонної сили опору від швидкості руху частинки (u) в беззіткневному режимі ($l_{ia} \gg r_D$). У випадку $a \ll r_D$ іонну силу опору можна визначити за допомогою відомої теорії парних зіткнень (binary collision approach). Проведені розрахунки показують, що для малих значень a/r_D результати, отримані на основі даної теорії, добре узгоджуються із результатами, які було отримано шляхом розв'язку кінетичних рівнянь. У випадку $a \sim r_D$ використання теорії парних зіткнень призводить до значної похибки при визначенні іонної сили опору. Це пояснюється тим, що дана теорія не враховує вплив нелінійних ефектів на розподіл потенціалу навколо частинки, а також не враховує вплив розміру частинки на довжину екранування її заряду в плазмі. Автором запропоновано модифікований варіант теорії парних зіткнень, який дозволяє врахувати зазначені недоліки. Показано, що результати, отримані на основі даної модифікації, добре узгоджуються із кінетичними розрахунками.

Вивчено вплив іон-атомних зіткнень на величину та напрям іонної сили опору (рис. 4). Показано, що іонна сила опору прямує до постійних значень в граничних випадках $l_{ia}/r_D \rightarrow \infty$ та $l_{ia}/r_D \rightarrow 0$. В беззіткневному режимі ($l_{ia} \gg r_D$) іонна сила опору є додатною ($F_d > 0$), тобто її напрям є протилежним до напрямку руху макрочастинки. При зменшенні числа Кнудсена l_{ia}/r_D напрям іонної сили опору змінюється і вона набуває від'ємних значень ($F_d < 0$). Зміна знаку іонної сили опору пов'язана із зміною поляризаційної складової F_e , оскільки механічна складова F_m завжди є додатною та в сильнозіткневному режимі виконується співвідношення $|F_e| \gg |F_m|$.

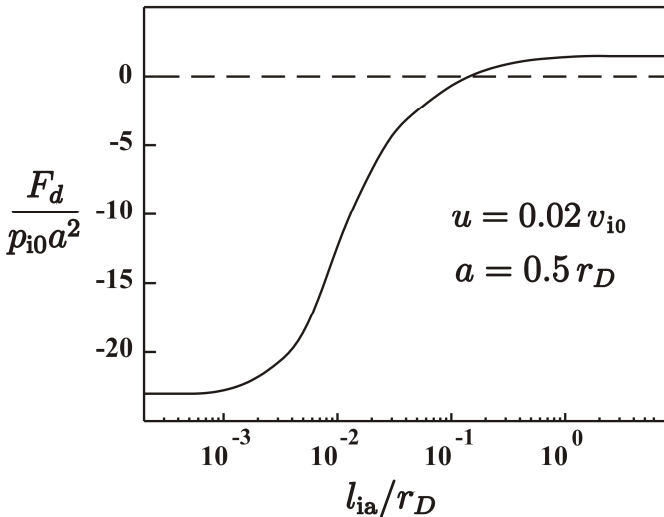


Рис. 4 Залежність нормованої сили іонного опору від числа Кнудсена l_{ia}/r_D в ізотермічній плазмі (p_{i0} – парціальний тиск іонів, v_{i0} – теплова швидкість іонів в плазмі).

Для якісного пояснення залежності іонної сили опору від числа Кнудсена проведено аналіз просторового розподілу густини електричного заряду в різних режимах зіткнень (рис. 5). В слабкозіткневному режимі анізотропія розподілу густини заряду є незначною, а густина заряду в області за частинкою перевищує густина заряду перед частинкою (рис. 5a). Оскільки частинка має від'ємний заряд, то в даному випадку напрям поляризаційної сили F_e співпадає із напрямком потоку плазми на частинку ($F_e > 0$). В сильнозіткневному режимі виникає помітна анізотропія в розподілі густини заряду (рис. 5b), а густина заряду попереду частинки стає більшою за густина заряду в області за частинкою. Даний ефект призводить до зміни знаку поляризаційної сили ($F_e < 0$) та іонної сили опору. Слід відзначити, що зміна поляризації плазми в сильнозіткневному режимі є наслідком поглинання іонів та електронів на поверхні частинки. Залежність іонної сили опору від швидкості потоку іонів в сильнозіткневному режимі є нелінійною (рис. 6). Це пов'язано із утворенням зони розрідження та порушенням квазінейтральності в області за частинкою при зростанні швидкості потоку.

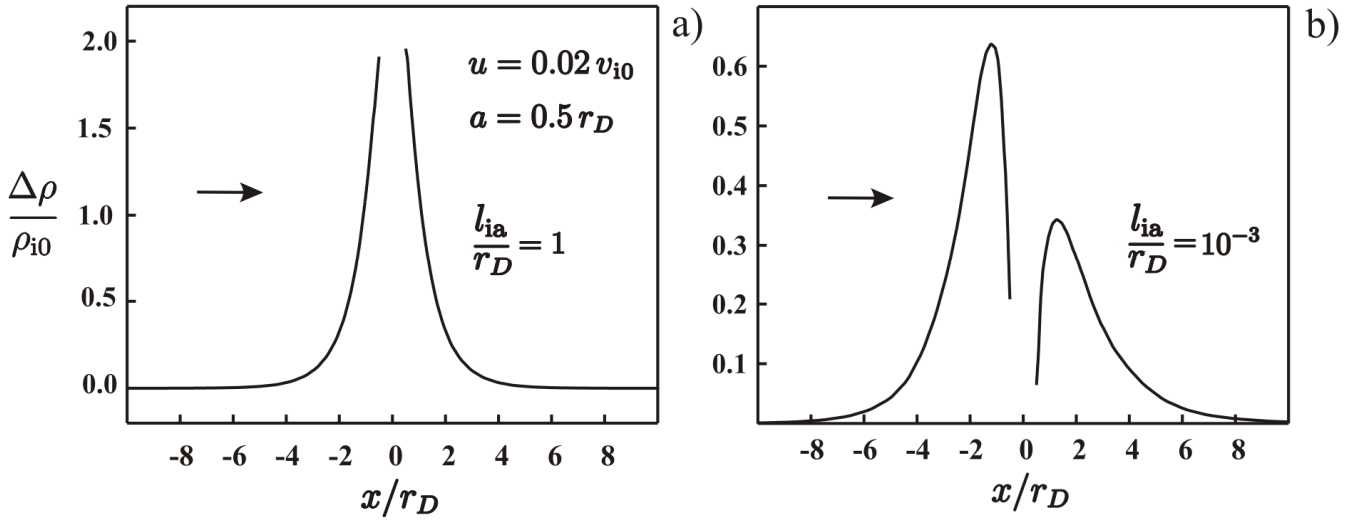


Рис. 5 Розподіли нормованої густини електричного заряду вздовж напрямку руху частинки (вісь x) в ізотермічній плазмі ($\Delta\rho$ – повна густина заряду, ρ_{i0} – густина заряду іонів в оточуючій плазмі). Стрілка вказує напрям потоку плазми на частинку.

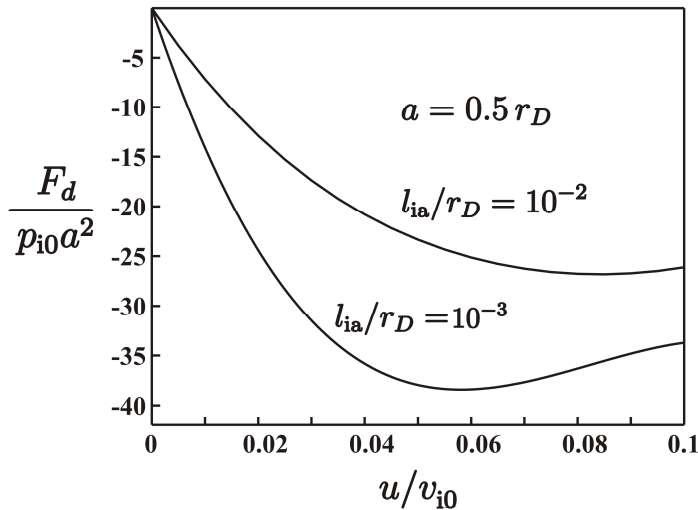


Рис. 6 Залежність нормованої сили іонного опору від швидкості потоку іонів у випадку ізотермічної плазми. Результати представлено для двох чисел Кнудсена: $l_{ia}/r_D = 10^{-2}$ та 10^{-3} .

Розглянуто проблему обчислення повної сили опору з боку плазми в сильноіонізованому режимі. Силою опору з боку електронів можна знехтувати за рахунок великої різниці між масою електрону та масами важких компонент (іонів та атомів). Таким чином величина та напрям результуючої сили опору залежать від співвідношенням між силою опору з боку іонів F_d та силою опору з боку нейтральної компоненти плазми F_s , яка в гідродинамічному режимі визначається відомою формулою Стокса. У випадку, коли температура іонів дорівнює температурі атомів, відношення абсолютних величин цих сил можна записати у вигляді $|F_d|/|F_s| = (n_{i0}/n_{a0})(\hat{F}_d/\hat{F}_s)$, де n_{i0} та n_{a0} це концентрації іонів та атомів в плазмі, а $\hat{F}_d$ та $\hat{F}_s$ це сили опору нормовані на парціальний тиск відповідної компоненти. На рис. 7 показано значення $\hat{F}_d/\hat{F}_s$, отримані для випадку $n_{i0}/n_{a0} \approx 10^{-8}$. Розрахунки показують, що в ізотермічній плазмі виконується співвідношення $|F_d| \ll |F_s|$, тобто повна сила опору з боку плазми є додатною. При підвищенні температури електронів відношення $\hat{F}_d/\hat{F}_s$ зростає. На основі відомих аналітичних моделей можна показати, що виконується співвідношення $\hat{F}_d/\hat{F}_s \sim z^2 (T_{e0}/T_{i0})^2$, де z слабко залежить від ступеня неізотермічності плазми. Розроблений метод чисельного розв'язку кінетичних рівнянь не дозволяє моделювати процес екранування частинки у випадку $T_{e0} \gg T_{i0}$. Проте результати, представлені на рис. 7, свідчать, що квадратична залежність від T_{e0}/T_{i0} виконується. Таким чином можна передбачити, що в типовій запорошеній плазмі, де температура електронів значно вища за температуру іонів ($T_{e0}/T_{i0} \sim 10^2$), сила опору з боку іонів буде мати один порядок із силою опору з боку нейтральної компоненти. В даному випадку частинка буде рухатися в надплинному режимі без тертя. Існування цього ефекту може пояснити аномально високі значення кінетичної енергії макрочастинок, які було отримано у типових експериментах з дослідження властивостей запорошеної плазми.

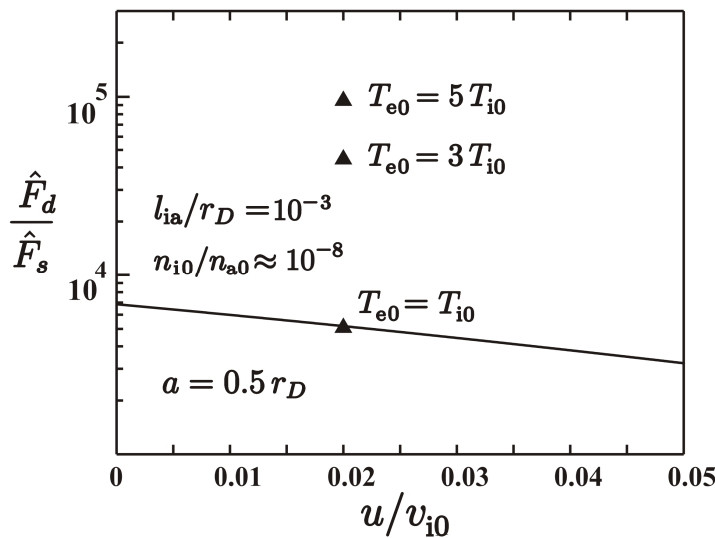


Рис. 7 Відношення нормованої сили опору з боку іонів до нормованої сили опору з боку нейтральної компоненти плазми у випадку $n_{i0}/n_{a0} \approx 10^{-8}$.

У висновках підсумовуються основні результати роботи.

ВИСНОВКИ

В даній дисертаційній роботі проведено теоретичний аналіз впливу зіткнень між компонентами слабоіонізованої плазми на характеристики процесів заряджання та екранування макрочастинок. Запропоновано новий підхід до моделювання вказаних процесів, який базується на прямому чисельному розв'язку самоузгодженої системи модельних кінетичних рівнянь для компонент плазми. Зокрема запропоновано новий тип модельних інтегралів зіткнень для опису зіткнень в багатокомпонентній плазмі, розроблено методи чисельного розв'язку кінетичних рівнянь у випадку сферичної та аксіальної симетрії та створено програмне забезпечення для комп'ютерної реалізації даних методів на багатопроцесорних обчислювальних системах. Проведено чисельне дослідження процесів заряджання та екранування макрочастинок в слабоіонізованій плазмі аргону. Отримано такі результати:

1. Визначено залежності заряду макрочастинок від довжини вільного пробігу для іон-атомних зіткнень (l_{ia}) при різних значеннях відношення розміру частинки (a) до довжини Дебая в плазмі (r_D). Встановлено, що дані залежності є немонотонними та мають мінімум в проміжному режимі зіткнень, коли довжина вільного пробігу іонів є одного порядку із розміром частинки ($l_{ia} \sim a$). Показано, що значення заряду малих частинок ($a \ll r_D$), отримані шляхом чисельного розв'язку кінетичних рівнянь, добре узгоджуються із результатами, які було отримано за допомогою відомих аналітичних моделей.
2. Проведено чисельний аналіз розподілів електричного потенціалу навколо частинок різного розміру в широкому діапазоні режимів зіткнень. Показано, що в беззіткневому ($l_{ia} \gg r_D$) та сильнозіткневому режимах ($l_{ia} \ll r_D$) результати, отримані шляхом чисельного розв'язку кінетичних рівнянь, добре узгоджуються із результатами, які було отримано на основі відомих підходів (нелінійна беззіткнева модель та дрейфово-дифузійна модель). Встановлено, що в зіткневій плазмі для широкого діапазону значень відношення a/r_D має місце неповне екранування заряду макрочастинок, тобто її електричний потенціал має асимптотичну поведінку кулонівського типу (r^{-1}). Визначено залежність ефективного (незаекранованого) заряду частинок різного розміру від довжини вільного пробігу іонів. Показано, що розподіл електричного потенціалу навколо малих частинок ($a \ll r_D$) добре описується за допомогою існуючих аналітичних моделей (лінійна кінетична модель із точковим стоком).
3. Проаналізовано залежність сили опору, що діє на макрочастинку з боку іонів в потоці плазми, від довжини вільного пробігу для іон-атомних зіткнень. Встановлено, що іонна сила опору може змінювати напрям при зменшенні довжини вільного пробігу іонів. Зокрема в сильнозіткневому режимі, коли довжина вільного пробігу іонів є набагато меншою за довжину Дебая в плазмі, іонна сила опору спрямована проти потоку плазми. Це пов'язано із зміною напрямку поляризаційної сили, яка діє на заряджену макрочастинку в плазмі.

4. Отримано нові дані щодо співвідношення між іонною силою опору та силою опору з боку нейтральної компоненти плазми в сильнозіткневому режимі. Ці дані свідчать про те, що в неізотермічній плазмі при певних умовах сила опору з боку іонів може бути одного порядку із силою опору з боку нейтральної компоненти.
5. Запропоновано модифікацію відомого аналітичного підходу (теорія парних зіткнень) до проблеми обчислення іонної сили опору в беззіткневому режимі, яка дозволяє урахувати вплив розміру частинки на процес її динамічного екранування в потоці плазми. Показано, що значення іонної сили опору, отримані на основі даної модифікації, добре узгоджуються із результатами, які були отримані шляхом чисельного розв'язку кінетичних рівнянь.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Semenov I. L. A study of dust grain screening in a weakly ionized plasma based on the numerical solution of the Vlasov-Bhatnagar-Gross-Krook kinetic equations / I. L. Semenov, A. G. Zagorodny, I. V. Krivtsun // Phys. Plasmas. – 2011. – Vol. 18, № 10. – P. 103707-1 – 103707-11.
2. Semenov I. L. Numerical study of grain charging kinetics on the basis of BGK kinetic equation / I. L. Semenov, A. G. Zagorodny, I. V. Krivtsun // Ukr. J. Phys. – 2011. – Vol. 56, № 2. – P. 138 – 143.
3. Semenov I. L. On the effect of ion-neutral collisions on dust grain screening in a low-pressure gas discharge plasma / I. L. Semenov, A. G. Zagorodny, I. V. Krivtsun // Phys. Plasmas. – 2012. – Vol. 19, № 4. – P. 043703-1 – 043703-8.
4. Semenov I. L. Ion drag force on a dust grain in a weakly ionized collisional plasma / I. L. Semenov, A. G. Zagorodny, I. V. Krivtsun // Phys. Plasmas. – 2013. – Vol. 20, № 1. – P. 013701-1 – 013701-11.
5. Semenov I. L. Ion drag force on a charged macroparticle in collisionless plasma / I. L. Semenov // Ukr. J. Phys. – 2013. – Vol. 58, № 3. – P. 228 – 236.
6. Semenov I. L. Numerical study of grain charging kinetics on the basis of BGK kinetic equation / I. L. Semenov, A. G. Zagorodny, I. V. Krivtsun // Dusty plasmas in applications: 3rd International conference on The Physics of Dusty and Burning Plasmas, 25-29 August, 2010: Books of Abstracts. – Ukraine, Odessa, 2010. – P. 54.
7. Semenov I. L. A kinetic study of dust grain screening based on the numerical solution of the Vlasov-Bhatnagar-Gross-Krook equations / I. L. Semenov, A. G. Zagorodny, I. V. Krivtsun // 39th EPS Conference & 16th Int. Congress on Plasma Physics, 2-6 July, 2012: Conference Abstracts. – Sweden, Stockholm, 2012. – Vol. 36F – URL: <http://ocs.ciemat.es/EPSICPP2012PAP/pdf/O4.310.pdf>
8. Semenov I. L. Shielding of a moving dust grain in a weakly ionized plasma / I. L. Semenov, A. G. Zagorodny, I. V. Krivtsun // Problems of Theoretical Physics: International Conference dedicated to the 100th anniversary of Alexander Davydov, 8-11 October, 2012: Program & Proceedings. – Ukraine, Kyiv, 2012. – P. 37.

АНОТАЦІЯ

Семенов І. Л. Вплив зіткнень на екранування макрочастинок в слабоіонізованій плазмі – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика. – Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, Київ, 2013.

В дисертаційній роботі проведено аналіз впливу зіткнень між компонентами слабоіонізованої плазми на процеси заряджання та екранування макрочастинок. Запропоновано новий підхід до моделювання вказаних процесів, який базується на чисельному розв'язку системи кінетичних рівнянь Власова із модельними інтегралами зіткнень. Отримано залежності заряду частинок різного розміру від частоти зіткнень іон-нейтрал. Показано, що в зіткневій плазмі електричний потенціал частинки завжди має асимптотичну поведінку кулонівського типу. Проведено аналіз впливу зіткнень іон-нейтрал на іонну силу опору, яка діє на частинку, що рухається. Показано, що іонна сила опору змінює напрям при зменшенні довжини вільного пробігу іонів. В гідродинамічному режимі, коли довжина пробігу іонів є набагато меншою за довжину Дебая, напрям іонної сили опору співпадає із напрямком руху частинки. Визначено залежність іонної сили опору від швидкості руху частинки в гідродинамічному режимі.

Ключові слова: слабоіонізована плазма, зіткнення, макрочастинки, заряджання та екранування, модельні кінетичні рівняння, чисельний розв'язок.

АННОТАЦИЯ

Семенов И. Л. Влияние столкновений на экранирование макрочастиц в слабоионизированной плазме – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова НАН Украины, Киев, 2013.

В диссертационной работе проведен анализ влияния столкновений между компонентами слабоионизированной плазмы на процессы зарядки и экранировки макрочастиц. Предложен новый подход к моделированию указанных процессов, который основан на численном решении системы кинетических уравнений Власова с модельными интегралами столкновений. Получены зависимости заряда макрочастиц различного размера от частоты столкновений ион-нейтрал. Показано, что в столкновительной плазме электрический потенциал макрочастицы всегда имеет асимптотическое поведение кулоновского типа. Проведен анализ влияния столкновений ион-нейтрал на ионную силу сопротивления, которая действует на движущуюся частицу. Показано, что ионная сила сопротивления меняет направление при уменьшении длины свободного пробега ионов. В случае, когда длина пробега ионов намного меньше длины Дебая (гидродинамический режим), ионная сила сопротивления направлена вдоль скорости движения частицы. Получена зависимость ионной силы сопротивления от скорости движения частицы в гидродинамическом режиме.

Ключевые слова: слабоионизированная плазма, столкновения, макрочастицы, зарядка и экранирование, модельные кинетические уравнения, численное решение.

ABSRTACT

Semenov I. L. Effect of collisions on screening of macroparticles in a weakly ionized plasma – Manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy degree (Candidate of Science in Physics and Mathematics) in speciality 01.04.02 – theoretical physics. – Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2013.

In the present work the effect of collisions on charging and screening of macroparticles in a weakly ionized plasma is analyzed. The interaction between plasma and macroparticles is studied using an approach based on the numerical solution of the Vlasov kinetic equations with model collision integrals (Vlasov-Bhatnagar-Gross-Krook or Vlasov-BGK equations). A new type of model collision integrals for multicomponent mixtures is developed. It is proved that this model satisfies all basic properties of the Boltzmann collision integrals: conservation laws, entropy inequality, H-theorem and known expressions for the first velocity moments of the collision integrals (momentum and energy exchange relations). A numerical method for solving the kinetic equations in the cases of spherical and axial symmetries is elaborated. The method is based on splitting of the kinetic equations by physical processes. The convective terms in the kinetic equations are approximated using the high-order finite volume schemes and the collision terms are approximated using the explicit or implicit-explicit Euler method. The special correction procedure is used to satisfy the discrete conservation laws for the model collision integrals. The Poisson equation for the self-consistent electric potential is solved using the finite-element method in the case of axial symmetry and by means of the Gauss-Ostrogradsky theorem in the case of spherical symmetry. In order to improve the computational efficiency the proposed method is parallelized on multiprocessor system using the shared-memory and distributed memory techniques.

The screening and charging of a spherical macroparticle in a weakly ionized plasma is studied for a wide range of collisional regimes. Two typical situations are considered: screening of the particle in a low-pressure argon discharge plasma and screening of the particle in a thermal argon plasma assumed to be in ionization equilibrium. The dependence of the particle charge on the mean free path for ion-neutral collisions is obtained for different ratios between the particle size and the Debye length in plasma. It is shown that this dependence is nonmonotonic and has a minimum in the transition collision regime where the mean free path for ion-neutral collisions is comparable with the particle size. In the case, when the particle size is much smaller than the Debye length, the values of the particle charge obtained by the numerical solution of the kinetic equations are compared to those obtained using different analytical models proposed earlier. It is shown that the most accurate results are obtained using the model proposed in (S. A. Khrapak, G. E. Morfill // *Phys. Plasmas.* – 2008. – Vol. 15 № 11. – P. 114503).

The influence of ion-neutral collisions on the distribution of the electric potential around the particle is analyzed. It is found that in collisional plasma the particle potential always has a Coloumb type asymptotical behavior related to the presence of charging currents and existence of some effective (unscreened) grain charge. The dependence of the effective charge on the mean free path for ion-neutral collisions is obtained for different particle sizes. For two limiting cases of the collisionless and strongly collisional plasma,

the present results are found to be in good agreement with those computed using the commonly known models: nonlinear collisionless model of Bystrenko (T. Bystrenko, A. Zagorodny // *Physics Letters A* – 2002. – Vol. 299, № 4. – P. 383) and drift-diffusion model (O. Bystrenko, A. Zagorodny // *Phys. Rev. E* – 2003. – Vol. 67, № 6. – P. 066403). The applicability of the linear kinetic models describing the distribution of the electric potential around the particle with radius much smaller than the Debye length is examined. It is shown that the model proposed in (S. A. Khrapak, B. A. Klumov, G. E. Morfill // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – Vol. 100, № 2. – P. 225003) gives a reasonable approximation for the electric potential in a wide range of collisional regimes. In the weakly collisional regime more accurate results can be obtained using the model proposed in (A. G. Zagorodny et al. // *Ukr. J. Phys.* – 2009. – Vol. 54, № 11. – P. 1089).

The dynamic screening of a spherical macroparticle moving in a weakly ionized plasma is studied. The main attention is focused on the problem of calculating the ion drag force acting on the particle. The effect of ion-neutral collisions on the ion drag force is analyzed in a wide range of ion collisionality. In the collisionless limit the obtained results are shown to be in good agreement with the results obtained by the well known binary collision approach. A modified version of the binary collision approach is proposed to calculate the ion drag force in the case when the particle size becomes comparable to the Debye length in plasma. It is shown that there is good agreement between the results obtained by the numerical solution of the kinetic equations and those obtained using the modified binary collision approach.

As the frequency of ion-neutral collisions increases, the ion drag force is found to decrease sharply and even become negative, i.e., it is directed oppositely to the plasma flow (along the particle velocity). On the basis of the analysis of charge density distributions around the particle a qualitative explanation of this effect is presented. The effect is shown to be caused by the interaction of the particle charge with flow-induced anisotropy of the plasma. In addition, comparison of the present results with those obtained using the drift-diffusion approach (A. G. Zagorodny et al. // *J. Phys. Stud.* – 2007. – Vol. 11, № 2. – P. 158) is discussed. The velocity dependence of the ion drag force in the highly collisional (hydrodynamic) regime is analyzed. It is shown that the velocity dependence is linear in the limit of small velocities and becomes nonlinear as the flow velocity increases. A qualitative explanation of the obtained velocity dependence is given. The relationship between the ion and neutral drag forces in the hydrodynamic regime is examined. When the plasma is isothermal, the neutral drag force is shown to be much greater than the ion drag force. It is guessed that the situation may change as the electron-to-ion temperature ratio increases. The dependence of the ion drag force on the electron-to-ion temperature ratio is analyzed. Using the obtained results, one can predict that in highly nonisothermal plasma the ion drag force becomes comparable with the neutral drag force and, thus, the total drag force acting on the particle decreases substantially.

Key words: weakly ionized plasma, collisions, macroparticles, screening and charging, model kinetic equations, numerical solution.

Семенов Ігор Львович

Вплив зіткнень на екранування макрочастинок в слабкоіонізованій плазмі

(Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
фізико-математичних наук)

Зам. – 7

Формат 60 x 84/16

Обл. – вид. арк. – 093.

Підписано до друку 10.09.2013 р.

Тираж 100 прим.

Поліграфічна дільниця ІТФ ім. М. М. Боголюбова НАН України,
03680, м. Київ, вул. Метрологічна, 14-б.