

Відгук офіційного опонента

на дисертаційну роботу Момота Андрія Івановича «Ефективні взаємодії та флуктуації у запорошенні слабкоіонізованій плазмі», подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02-теоретична фізика.

Основна частина дисертації А. І. Момота присвячена питанням, що пов'язані з визначенням заряду порошинок у плазмі, розподілу потенціалу навколо порошинок, вивченням сил, що діють на порошинки, та визначенням властивостей іонно-звукових хвиль у запорошенній плазмі.

Із запорошеною плазмою доводиться мати діло за розв'язання різних фізичних задач та в природі. Порошинки спостерігаються поблизу штучних супутників Землі, космічних апаратів, хвостах комет, планетарних кільцях та іоносферах планет. Вони також з'являються у різного роду газових розрядах, в які вони можуть потрапити в результаті ерозії електродів чи стінок, а також за формування в об'ємі хімічно-активної плазми (наприклад, у сумішах газів з метаном, ацетиленом, моносиланом та ін.). Також порошинки були виявлені в установках керованого термоядерного синтезу з магнітним утриманням та під час плазмової обробки поверхонь. Тому, запорошена плазма зараз інтенсивно вивчається у провідних наукових центрах США, Франції, Японії, ФРН, України та інших країн світу.

Дисертаційна робота пов'язана із планами науково-дослідних робіт, які проводились у рамках держбюджетних тем та міжнародних проектів на кафедрі фізики функціональних матеріалів фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Також робота виконувалась в рамках бюджетних тем та міжнародних проектів відділу теорії та моделювання плазмових процесів та відділу синергетики Інституту теоретичної фізики імені М.М. Боголюбова НАН України. Дослідження, які представлено в дисертації, відповідають тематиці наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок Міністерства освіти і науки України на 2019-2021 роки (зокрема, тематиці «Наукові основи та проблеми технічних, фізико-математичних та інших природничих наук»). Таким чином, дисертація спрямована на розв'язання важливої науково-технічної проблеми, а її актуальність не викликає сумнівів.

Дисертація включає вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки.

Перший розділ являє собою огляд літератури та опис різних теоретичних підходів, що використовуються для опису запорошеної плазми.

У другому розділі вивчається розподіл електростатичного потенціалу навколо порошинки (ефективний потенціал порошинки), який створюється її зарядом і плазмовим оточенням. Розглянуто випадки, коли заряд порошинки вважається заданим та коли він визначається потоками іонів та електронів на порошинку. Отримано аналітичний вираз для потенціалу порошинки з урахуванням її заряджання плазмовими струмами. При цьому, для опису потоків електронів та іонів на порошинку використано дрейфово-дифузійне наближення. У цьому ж розділі на основі кінетичного рівняння Батнагара – Гросса – Крука (БГК) розвинуто новий підхід до вивчення ефективного потенціалу порошинки у слабкоіонізованій плазмі. За цього підходу поглинання електронів та іонів порошинкою описано шляхом введення ефективних точкових стоків у кінетичні рівняння для плазмових частинок. Проаналізовано розв'язки задачі про

ефективні потенціали порошинки з урахуванням залежності іонного перерізу заряджання порошинки від швидкості іонів. Також досліджено вплив зовнішнього однорідного магнітного поля на заряджання та ефективний потенціал порошинок у сильнозіткненній плазмі, використовуючи дрейфово-дифузійне наближення. З'ясовано, що магнітне поле пригнічує потік електронів до порошинки і її від'ємний заряд зменшується. Результати числових розрахунків порівняно з тими, які було здобуто з аналітичних моделей.

У третьому розділі обчислено силу взаємодії між двома однаковими зарядженими сферичними частинками, які вміщені у слабкоіонізоване сильнозіткнене ізотермічне плазмоподібне середовище. Розглянуто випадок, коли заряд сферичних частинок є фіксованим і вони не поглинають електрони та іони з навколоишньої плазми, а також випадок, коли сферичні частинки заряджаються плазмовими струмами. У першому випадку використовувалася модель Пуассона – Больцмана і розглядались як провідні частинки, так і частинки з однорідним розподілом поверхневого заряду, а у другому – динаміка заряджання провідних порошинок описувалась у дрейфово-дифузійному наближенні. Було з'ясовано, що у першому випадку на великих відстанях силу взаємодії між частинками можна описати силою, яка отримана з потенціалу Дебая з ефективним зарядом. У другому випадку на малих відстанях між сферичними частинками їх взаємний вплив є найбільшим. Проявами цього впливу є поляризація поверхневого заряду, а також суттєве зменшення стаціонарного заряду сферичних частинок зі зменшенням відстані між їх центрами. З'ясовано, що зменшення зарядів пов'язане зі зменшенням струмів заряджання.

У четвертому розділі розглянуто заряджену провідну сферичну порошинку, що стаціонарно рухається у слабкоіонізованій плазмі з частими зіткненнями. В рамках дрейфово-дифузійного наближення обчислено силу тертя, яка діє на порошинку. Показано, що розподілі електронів та іонів навколо порошинки утворюють таке електричне поле, що сила, яка діє на порошинку направлена вздовж її швидкості, тобто має місце від'ємне тертя. У цьому ж розділі також розвинуто кінетичний опис ефективного потенціалу порошинки у слабкоіонізованій плазмі за присутності зовнішнього постійного електричного поля, знайдено силу тертя, яка діє на порошинку з боку потоку іонів, а також середні і середньоквадратичні зміщення плазмових частинок.

У п'ятому розділі узагальнено кінетичну теорію великомасштабних флюктуацій у слабкоіонізованій плазмі на випадок присутності зовнішнього постійного електричного поля. Показано, що зовнішнє електричне поле може призводити до нестійкості іонно-звукових хвиль. Виконано числове дослідження впливу зіткнень і зовнішнього електричного поля на спектри флюктуацій концентрації електронів, показано що поле призводить до аномального росту інтенсивності флюктуацій. Також запропоновано новий підхід до послідовного кінетичного опису великомасштабних флюктуацій у запорошенні слабкоіонізованій плазмі з урахуванням зіткнень плазмових частинок як з нейтралами, так і з порошинками, а також флюктуацій заряду порошинок внаслідок їх заряджання плазмовими струмами. Отримано вираз для функції діелектричного відгуку і на його основі вивчено вплив процесів заряджання та зіткнень частинок на спектри і декременти згасання іонно-звукових хвиль у запорошенні плазмі. Досліджено вплив порошинок на спектри флюктуацій у плазмі та показано, що присутність порошинок зі змінним зарядом суттєво впливає на спектри флюктуацій електронної густини.

У висновках сформульовано основні результати роботи.

Новизна результатів дисертаційної роботи визначається тим, що в ній вперше:

На основі кінетичного рівняння Батнагара – Гросса – Крука (БГК) розвинуто підхід для вивчення ефективного потенціалу порошинки у слабкоіонізованій плазмі. За цього підходу поглинання електронів та іонів порошинкою описано шляхом введення ефективних точкових стоків в кінетичних рівняннях для плазмових частинок. Знайдено аналітичний вираз для ефективного потенціалу порошинки у зіткненній плазмі із зовнішнім постійним магнітним полем. Показано, що такий потенціал має кулонівську асимптотику з ефективним зарядом, що є функцією кута між радіус-вектором та напрямком магнітного поля. Зазначу, що у більшості попередніх робіт, в яких вивчалася запорошена плазма у кінетичному наближенні, не враховувалися зіткнення електронів та іонів з нейтральними частинками.

В рамках дрейфово-дифузійного наближення чисельно розраховано ефективний потенціал зарядженої частинки скінченного розміру, яка міститься у сильнозіткненному плазмоподібному середовищі. Розглянуто як випадок частинки, що поглинає електрони та іони (порошинка), так і випадок частинки із заданим зарядом (колоїдна частинка). Показано, що потенціал порошинки із точністю до декількох відсотків, можна описати сумою кулонівського потенціалу та потенціалу Дебая з масштабованою довжиною екраниування, яка у декілька разів більша за радіус Дебая. Основну увагу приділено неізотермічній плазмі, в той час, як увага попередніх авторів була сконцентрована на ізотермічній плазмі. Крім того, попередніми авторами було запропоновано аналітичні вирази для опису потенціалу навколо порошинки у плазмі без зіткнень, або слабозіткненній плазмі. Дисертантом запропоновано аналітичну формулу для опису потенціалу у сильнозіткненному плазмоподібному середовищі, що є типовим для експериментів із запорошеною плазмою.

Чисельно розв'язано задачу про екраниування порошинки у слабкоіонізованій сильнозіткненній плазмі за присутності постійного зовнішнього магнітного поля. Вивчено просторовий розподіл потенціалу і густини заряду поблизу порошинки та виконано порівняння з аналітичними оцінками. Показано, що в напрямку, паралельному зовнішньому магнітному полю, ефективний потенціал може мати немонотонну поведінку.

Виконано числове дослідження сил взаємодії між двома зарядженими сферичними провідними частинками скінченних розмірів, які знаходяться у слабкоіонізованому сильнозіткненному ізотермічному плазмоподібному середовищі. Обчислення проведено для випадку частинок з фіксованим електричним зарядом (колоїдних частинок), а також для частинок, які заряджаються плазмовими струмами (порошинок). Показано, що на великих відстанях сила взаємодії між колоїдними частинками має асимптотику Дебая, в той час як для порошинок спостерігається кулонівська поведінка з ефективним зарядом. Ці дослідження проведено у зв'язку з тим, що на сьогодняшній день проблема впливу скінченного розміру частинок на силу взаємодії між ними ще є недостатньо дослідженою. Тим часом, такий вплив необхідно знати для коректного опису формування плазмових кристалів та моделювання впорядкованих структур у запорошений плазмі.

В рамках дрейфово-дифузійного наближення обчислено силу тертя, яка діє на сферичну провідну порошинку, що стаціонарно рухається у сильнозіткненній плазмі. Показано, що як для ізотермічної, так і неізотермічної плазми, розподіли електронів та іонів навколо порошинки утворюють таке електричне поле, що сила, яка діє на порошинку направлена вздовж її швидкості, тобто має місце від'ємне тертя. В рамках моделі точкових стоків знайдено наближені аналітичні вирази для сили тертя і визначено межі їх застосовності шляхом порівняння з результатами обчислень. Визначено, що сила від'ємного тертя може перевищувати силу тертя з

нейтральними частинками, яка описується законом Стокса. У попередніх роботах з цієї тематики не розглядались частоти зіткнень, які відповідають дрейфово-дифузійному наближенню.

Узагальнено кінетичну теорію великомасштабних флюктуацій у плазмі на випадок присутності зовнішнього електричного поля з урахуванням зіткнень плазмових частинок, які описувались на основі моделі БГК. Дисперсійне рівняння для такої плазми розв'язано чисельно в області іонно-звукових хвиль. Показано, що зовнішнє електричне поле може призводити до нестійкості іонно-звукових хвиль. Виконано числове дослідження впливу зіткнень і зовнішнього електричного поля на спектри флюктуацій концентрації електронів та показано, що поле призводить до аномального росту інтенсивності флюктуацій. На сьогоднішній день вплив постійного зовнішнього електричного поля на резонансні властивості флюктуацій поблизу порогу нестійкості, які індуковані цим полем, вивчено недостатньо. Більшість попередніх робіт в цій області була сфокусована на випадку зовнішнього змінного електричного поля.

На основі кінетичного опису досліджено діелектричні властивості запорошеної плазми з урахуванням заряджання порошинок плазмовими струмами та зіткнень плазмових частинок з нейтральними. Показано, що зіткнення електронів та іонів з порошинками, а також флюктуації заряду порошинок є додатковими механізмами дисипації енергії іонно-звукових хвиль і призводять до суттевого зростання модуля декременту загасання. З'ясовано, що присутність порошинок із змінним зарядом суттєво впливає на спектри флюктуацій електронної густини. Основними факторами цього впливу є: зменшення у запорошений плазмі, якщо порівнювати з незапорошеною плазмою, концентрації електронів по відношенню до концентрації іонів, збільшення частоти зіткнень іонів через зіткнення з порошинками і флюктуації заряду порошинок. Властивості іонно-звукових хвиль з урахуванням флюктуацій заряду порошинок досліджувалися попередніми авторами переважно на основі гідродинамічного підходу. Кінетичний підхід для опису іонно-звукових хвиль раніше використовувався у декількох роботах, але лише для плазми без зіткнень.

Практична цінність результатів дисертації полягає в тому, що вони є помітним внеском до теоретичного опису процесів, що відбуваються у запорошений плазмі. Вони будуть корисними для контролювання процесів, які мають місце в установках для керованого термоядерного синтезу, а також за плазмових технологій, де спостерігаються порошинки. Результати дисертації також можуть бути застосовані за досліджені космічної плазми міжзоряного простору, хвостів комет, планетарних кілець та іоносфер планет.

Результати дисертації дозволяють краще зрозуміти заряджання порошинок та їх екранування у плазмі, взаємодію макрочастинок у плазмі, точніше описати флюктуації та іонно-звукові хвилі у плазмі.

Отримані результати можуть бути використані у таких наукових установах як ННЦ ХФТІ (м. Харків), Орлеанський університет (Франція), Кільський університет та Рурський університет м. Бохум (ФРН), Аубурн університет та Айова університет (США) та інших, де проводяться експерименти із запорошеною плазмою. Вони також можуть бути використані в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна, Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, Інституті теоретичної фізики імені М.М. Боголюбова Національної академії наук України та інших наукових та навчальних центрах України та країн світу, де проводяться теоретичні дослідження в області запорошеної плазми.

Наукові положення дисертації, її основні висновки та рекомендації виглядають достатньо обґрунтованими та достовірними. Цей висновок зумовлений використанням у

дисертаційній роботі добре апробованих методів теоретичної фізики та числових методів, зокрема методу скінчених елементів. Запорукою обґрунтованості основних положень дисертації є також широка апробація її результатів на 15 національних та міжнародних наукових конференціях протягом 2007-2018 pp.

Вважаю, що дисертаційна робота А. І. Момота засвідчує високу кваліфікацію її автора в галузі теоретичної фізики, володіння ним як методами аналітичних розрахунків, так і методами комп'ютерного моделювання.

Результати дисертаційної роботи з достатньою повнотою викладені у 21 статтях в наукових виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus, та монографії, яку опубліковано у видавництві «Наукова думка». Серед цих статей значна кількість робіт опублікована в журналах з імпакт-фактором вище 1 (Physical Review E, Physics of Plasmas, Contributions to Plasma Physics, Journal of Experimental and Theoretical Physics, Europhysics Letters, Physica Scripta).

Зміст автореферата ідентичний основним положенням дисертації.

Між тим, до дисертації можна висловити окремі зауваження та побажання.

1. Більшість результатів, що представлено у дисертаційній роботі, стосується порошинок мікронного розміру. Було б добре розглянути також випадки порошинок субмікронного та нанометрового розмірів, які доволі часто спостерігаються у хімічно-активній плазмі газових розрядів.
2. Перед рівнянням (2.17) вказано, що в моделі Пуассона – Больцмана має місце насичення ефективного заряду. Було б добре пояснити з фізичної точки зору, чому має місце це насичення. Було б добре також детально пояснити, чому у неізотермічній плазмі q^{eff} , як правило, є набагато більшим ніж ефективний заряд ДЛФО.
3. Результати дисертаційної роботи не порівняно напряму з експериментальними даними інших авторів. Було б добре це зробити.
4. Описуючи рух іонів у дрейфово-дифузійному наближенні, у рівнянні руху іонів нехтується складовим, що пропорційне $(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v}$. Тому, цей підхід не можна застосовувати для низьких та середніх тисків робочого газу.
5. У дрейфово-дифузійному наближенні вважається, що концентрації електронів та іонів на поверхні порошинки дорівнюють нулю (розділ 2). Зазвичай, описуючи густину іонів у газових розрядах, вважають, що потоки іонів та електронів до поверхні є рівними, а густина електронів задовольняє розподілу Больцмана біля поверхні. На мою думку, подібні крайові умови можна було використати для знаходження потенціалу навколо порошинок. Було б добре показати, як результати числових розрахунків залежать від крайових умов.
6. Розрахунки у розділі 2 проведено, вважаючи, що довжина вільного пробігу електронів не залежить від їхньої температури. Було б добре пояснити для яких газів це припущення справедливе. Для багатьох газів частота зіткнень електронів з частинками нейтрального газу не є лінійною функцією середньої швидкості електронів.
7. У розділах 2 та 5 висновки наведено після кожного підрозділу. Було б краще надати сумарні висновки наприкінці кожного розділу. Це б дало можливість для кращого підбиття результатів кожного розділу.

Втім, указані недоліки не впливають на загальну високу оцінку роботи.

Підсумовуючи викладене вище, вважаю, що за обсягом і рівнем наукових результатів, кількістю та якістю публікацій дисертаційна робота Андрія Івановича Момота «Ефективні взаємодії та флюктуації у запорошенні слабкоіонізованій плазмі» відповідає вимогам чинних нормативних документів МОН України до докторських дисертацій, а її автор цілком заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізики-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

15.11.2019

Денисенко Ігор Борисович

доктор фізики-математичних наук, професор,

професор кафедри прикладної фізики та фізики плазми

Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

