

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Ольшанського Валентина Васильовича “Параметрична кінетична нестійкість та турбулентність плазми в газових розрядах і термоядерних пристроях”, подану на здобуття наукового ступеню доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

Тема дисертації безпосередньо пов'язана з проблемою керованого термоядерного синтезу (КТС). Добре відомо, що для додаткового нагрівання термоядерної плазми остання опромінюється потужними електромагнітними хвилями – звичайно на частоті електронного чи іонного циклотронного резонансу або нижньогібридного резонансу. Дослідження, викладені в дисертації, якраз і присвячені параметричним кінетичним нестійкостям та турбулентності плазми, що розвиваються за таких умов. Частина роботи присвячена розділенню ізотопів та розробці геліконних джерел щільної плазми. Таким чином, актуальність теми дисертації не викликає сумніву.

За останні десятиріччя числове моделювання стало третім – поруч із експериментом і теорією – методом фізичних досліджень. Без нього були б неможливими ні детальне вивчення процесів у плазмі термоядерних пристроїв, ні прогностичні дослідження стосовно пристроїв наступних поколінь, зокрема міжнародного реактора-токамака ІТЕР. В дисертації розроблено фізичну та числову моделі для самоузгодженого кінетичного моделювання плазмових розрядів низького тиску з урахуванням зіткнень на основі методу частинка-сітка. Зіткнення враховуються методом Монте-Карло.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку – списку публікацій здобувача за темою дисертації. У вступі подано необхідні відомості щодо актуальності теми роботи, її зв'язку з науковими програмами, мета дослідження, новизна та практичне значення результатів, публікацій і особистого внеску автора та апробації робіт.

У першому розділі розглянуто низькочастотні параметричні турбулентності, а саме іонно-звукову турбулентність плазми в магнітному полі, іонну циклотронну турбулентність, що пов'язана зі збудженням іонних мод Бернстайна, та нижньогібридну турбулентність у плазмі з іонами одного та двох сортів. Дано оцінки рівня турбулентності та швидкості турбулентного нагрівання електронів та іонів і результати моделювання цих явищ. Вказано експерименти, де така турбулентність могла виникати.

Розроблено фізичну та числову моделі для самоузгодженого кінетичного моделювання плазмових розрядів низького тиску з урахуванням зіткнень на основі методу частинка-сітка, поєднаного з методом Монте-Карло. До моделі закладено можливість використання реалістичних конфігурацій ВЧ антен, що застосовуються в експериментах, шляхом завдання кількох параметрів з урахуванням скінченних розмірів провідників антени.

Виконано комп'ютерне моделювання низькочастотних параметричних кінетичних нестійкостей, зокрема, параметричної іонної циклотронної нестійкості і знайдені її основні характеристики.

У другому розділі розглянуто можливість використання циклотронного резонансу в плазмі для розділення ізотопів. Це пов'язано з необхідністю розділення ізотопів перспективних щодо можливого застосування елементів, які не мають газової фази – наприклад, ізотопів гадолінію Gd^{157} та Gd^{155} , які мають дуже великі перерізи захоплення нейтронів і можуть бути ефективно використані в атомних реакторах як домішки, що вигорають, або ізотопів літію Li^6 та Li^7 .

Показано, що за типових значень параметрів плазми, магнітного поля і змінного електричного поля в умовах іонного циклотронного резонансу для суміші ізотопів літію або гадолінію після досягнення різницею швидкостей резонансних та нерезонансних іонів значення порядку їхньої теплової швидкості в плазмі розвивається параметрична нестійкість і збуджуються дрібномасштабні потенціальні іонні циклотронні коливання з поперечною (щодо магнітного поля) компонентою хвильового числа порядку оберненого ларморівського радіусу іонів і значно меншою поздовжньою компонентою.

У третьому розділі подані результати експериментальних та теоретичних досліджень коливальних та хвильових явищ, що спостерігаються в пристінковій області торсатрона Ураган-3М під час створення плазми та її нагрівання ВЧ розрядом у діапазоні частот іонно-циклотронного резонансу, що супроводжується переходом до покращеного утримання. Описані основні результати діагностичних вимірювань спектрального складу коливань, а також того, як фази та амплітуди залежать від часу та від ВЧ потужності під час її введення в плазму.

Представлені результати, отримані на базі дворідинної гідродинаміки. У лінійному наближенні вивчені рівняння, що описують вплив відгуку плазми на проникнення зовнішніх низькочастотних гвинтових збурень у токамак (частота зовнішніх збурень не перевищує частоту електрон-іонних зіткнень). Для параметрів токамаків TEXTOR-DED та НУВТОК-II отримана структура гвинтового поля у плазмі, потоки плазми у цьому полі, збурення профілю струму в плазмі та профіль сили, яка може обертати плазму. Розглянуто циліндричну та тороїдальну геометрію.

У четвертому розділі досліджено один із способів збільшення густини плазми в геліконних джерелах – створення ефективного індукційного високочастотного розряду в зовнішньому полі постійного магніту.

Ефективність роботи джерела плазми може бути збільшена як за рахунок застосування спеціальних антен, які випромінюють спрямовані геліконні хвилі, що дозволяє збільшити максимальну густину плазми в два рази, так і за рахунок використання неоднорідного магнітного поля.

Для вирішення поставленої проблеми побудовані самоузгоджені гідродинамічна та кінетична моделі геліконного джерела плазми. На основі цих моделей розроблено комп'ютерні коди та проведено моделювання фізичних процесів, що відбуваються в джерелах з неоднорідними параметрами плазми і магнітного поля.

Розглянуто поширення і поглинання електромагнітних хвиль у плазмі, яке

визначається багатьма факторами. Зокрема, останнім часом інтенсивно вивчається вплив неоднорідності й топології магнітного поля на характеристики геліконного розряду і ефективність роботи геліконних джерел плазми. Серед багатьох різновидів індукційних джерел плазми низького тиску саме геліконні джерела здатні продукувати низькотемпературну щільну плазму при невеликих магнітних полях і невеликій питомій потужності. Такі джерела активно досліджуються і широко застосовуються в плазмохімічних технологіях. Зокрема, на їхній основі будуються плазмохімічні реактори для обробки матеріалів. Вони використовуються при створенні активних середовищ для газових лазерів, для генерації плазми в магнітних пастках, для розробки нових методів прискорення заряджених частинок, утилізації шкідливих відходів тощо.

Показано, що в сильно неоднорідному магнітному полі поглинання енергії ВЧ поля виявляється значно більш ефективним, ніж в однорідному магнітному полі. При цьому в середньому воно залишається високим на різних віддальх від осі системи.

Виявлено, що сильний градієнт магнітного поля в області розташування антени приводить до швидкого зростання густини плазми разом зі зростанням величини магнітного поля в аксіальному напрямку. Аксіальний профіль густини плазми має плоску ділянку, яка, ймовірно, пов'язана з наявністю локального магнітного дзеркала біля мінімуму магнітного поля.

Температура електронів виявляється суттєво неоднорідною. При несиметричному розташуванні антени в робочому об'ємі розрядної камери вона значно збільшується при віддаленні від антени в бік більш сильного магнітного поля.

У Висновках сформульовано основні результати роботи.

1. Вперше розроблено фізичну та числову моделі і відповідні комп'ютерні коди для самоузгодженого кінетичного моделювання плазмових розрядів низького тиску в електростатичному та електромагнітному полі з урахуванням зіткнень на основі методу частинка-сітка, поєднаного з методом Монте-Карло.

2. Показано, що висока ефективність геліконних джерел плазми обумовлена кінетичною іонно-звуковою параметричною нестійкістю.

3. За допомогою комп'ютерного моделювання методом макрочастинок визначено такі важливі характеристики низькочастотної параметричної турбулентності, як рівень її насичення та швидкість турбулентного нагрівання плазми.

4. Вперше показано, що в установках для розділення ізоотопів методом іонно-циклотронного нагрівання може розвиватись іонно-циклотронна нестійкість. Вона виникає, коли різниця азимутальних швидкостей резонансних та нерезонансних іонів стає порядку їхньої теплової швидкості. В результаті ефективність даного методу розділення ізоотопів суттєво погіршується.

5. Запропоновано інтерпретацію результатів зондових вимірювань густини плазми, проведених в експериментах зі створення та нагрівання плазми на торсатроні Ураган-3М (Харків, Україна) електромагнітними хвилями з частотою порядку циклотронної частоти іонів, які виявили флуктуації густини плазми на

гармоніках іонно-циклотронної частоти. Результати експерименту можна пояснити розвитком параметричної електрон іонної нестійкості.

6. Досліджено проникнення зовнішніх гвинтових збурень у плазму токамака, що використовуються для керування процесами перенесення в пристінковій області. Доведено, що найбільш небезпечними з точки зору утримання плазми в токамаках є нестійкості зовнішніх гвинтових мод, тобто мод, резонансна поверхня яких лежить поза плазмою.

7. Вперше проведено моделювання геліконного джерела іонів із циліндричною геометрією у сильному неоднорідному магнітному полі з використанням неявного кінетичного самоузгодженого числового коду. Виявлено, що сильний градієнт магнітного поля в області розташування антени приводить до швидкого зростання густини плазми разом зі зростанням аксіального магнітного поля. Показано, що аксіальний профіль густини плазми має плоску ділянку, яка, ймовірно, пов'язана з наявністю локального магнітного дзеркала біля мінімуму магнітного поля.

8. Виявлено, що при несиметричному розташуванні антени в робочому об'ємі розрядної камери геліконного джерела температура електронів значно збільшується при віддаленні від антени в напрямку градієнту магнітного поля.

9. Вперше досліджено процес заряджання порошинок у низькотемпературній геліконній плазмі малого тиску під час розвитку параметричної іонно-звукової нестійкості. Час заряджання порошинок узгоджується з часом, передбаченим теорією. При цьому стаціонарний заряд пилових частинок на периферії плазми виявляється більшим, ніж усередині плазми.

10. Доведено, що нестаціонарність геліконного розряду в умовах розвитку іонно-звукової параметричної нестійкості збільшує амплітуду флуктуацій заряду порошинок.

Результати, наведені у дисертації та у концентрованому вигляді подані у висновках є новими та оригінальними. Вони мають практичну цінність і заслуговують на увагу. У дисертаційній роботі отримано низку нових, цікавих та практично важливих результатів, частина з яких отримана вперше у світі. Треба особливо відмітити використані в дисертації новітні методи числових розрахунків.

Результати, наведені в дисертації, цілком достовірні. Це забезпечується коректністю виконаних розрахунків та узгодженням отриманих результатів з експериментальними даними. Додатковим підтвердженням достовірності результатів є те, що статті, на основі яких написана дисертація, пройшли ретельне рецензування із залученням провідних спеціалістів галузі.

За темою дисертаційної роботи опубліковані 37 наукових праць, серед яких 9 статей у виданнях України, що індексуються в міжнародних наукометричних базах; 2 статті в зарубіжних виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах з квантилем Q3; 5 статей у зарубіжних виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах з квантилем Q1 або Q2; 21 публікація носить характер апробації.

Кількість публікацій за темою дисертації відповідає вимогам МОН України щодо публікацій здобувачів наукового ступеня доктора наук.

Автореферат із достатньою повнотою відбиває зміст дисертаційної роботи.

Загалом дисертант продемонстрував віртуозне володіння різноманітними методами теоретичного дослідження та числового моделювання плазми. Привабливою рисою роботи є її зорієнтованість на експеримент.

У той же час до дисертації можна висловити деякі зауваження та побажання.

1. При дослідженні параметричної нижньогібридної нестійкості в надзвуковому режимі автор обмежився розрахунком частот та інкрементів збуджуваних хвиль. З точки зору можливого порівняння з результатами експерименту цікаво було б оцінити рівень насичення нестійкості.

2. Результатам розрахунків у тексті роботи не завжди дається якісна інтерпретація. Це стосується, наприклад, впливу неоднорідності магнітного поля на властивості плазми геліконного розряду (див. розділ 4, п. 4.1).

3. Цілий ряд зауважень можна висловити до оформлення дисертації.

- Не завжди дається зрозуміла розшифровка позначень у формулах. Це стосується, наприклад, величин $\delta\epsilon_\alpha(\omega, k)$ у формулі (1.83). Сказано, що це вклад електронів та іонів в діелектричну проникність плазми, але відповідні аналітичні вирази відсутні. Висловлене зауваження стосується й формули (3.6).

- На с. 159 читаємо: «Коливання, що збуджуються поблизу першої гармоніки, зростають до рівня $\gamma/\omega_{ci} \approx 0,00038$ ». Позначення не розшифровані, але в інших місцях γ позначає інкремент. Неясно, як ця величина може характеризувати рівень насичення нестійкості.

- У наведеній на с.160 формула $\mathbf{v}_\parallel = (\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{k} - \mathbf{k} \cdot \mathbf{u})/k_\parallel \sim \mathbf{v}_{Te}$ явно допущена помилка – в чисельнику від вектора віднімається скаляр.

- Під рис.4.1.читаємо: «Розподіл неоднорідного зовнішнього магнітного поля». Насправді, треба думати, йдеться про аксіальну компоненту поля. Оскільки в тексті йдеться про напрямок поля, бажано було б показати ще й конфігурацію магнітних силових ліній – хоча б якісно. Така картинка могла б пояснити й подальше припущення про виникнення в аналізованій системі магнітного дзеркала.

- На рис. 3.6 - 3.7 наведені залежності частот та інкрементів нестійкості від поперечного хвильового числа. Незрозуміло, чому інтервал значень поперечного хвильового числа для частот та інкрементів неоднаковий.

- На рис 4.18 - 4.19 наведені просторові розподіли, на яких потенціал та густина іонів показані відтінками сірого. Однак шкали, які дозволили б оцінити числові значення цих величин, на жаль, відсутні.

- В дисертації вживаються одночасно терміни «нестійкість» і «нестабільність». У наукових текстах така неоднозначність небажана. Незрозуміло й уживання терміну «брейкдаун» замість звичайного «пробій». Словосполучення «ін-

кремент нестійкості» – це тавтологія, оскільки сам термін «інкремент» уже вказує саме на зростання коливань (аналогічно – «декремент згасання»).

- В тексті трапляються невдалі вирази («У певний момент, амплітуда коливань починає збільшуватися в геометричній прогресії» – с. 159) та окремі граматичні помилки.

Однак зроблені зауваження (більшість яких стосується оформлення роботи) не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

Вважаю, що дисертаційна робота «Параметрична кінетична нестійкість та турбулентність плазми в газових розрядах і термоядерних пристроях» виконана на високому науковому рівні та є завершеною працею, в якій здобуто нові теоретичні результати та зроблено чіткі висновки, а її зміст повністю відповідає науковій спеціальності 01.04.08 — фізика плазми.

Автореферат та дисертація оформлені згідно вимог Атестаційної колегії Міністерства освіти та науки України. В.В. Ольшанський є фахівцем високої кваліфікації, наукові роботи якого отримали визнання як в Україні, так і в світі. За обсягом проведених досліджень, їхнім рівнем, науковою новизною та практичною цінністю здобутих результатів дисертаційна робота «Параметрична кінетична нестійкість та турбулентність плазми в газових розрядах і термоядерних пристроях» відповідає всім вимогам “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року (зі змінами, внесеними постановами КМ. № 656 від 19 серпня 2015 року, № 1159 від 30 грудня 2015 року, № 567 від 27 липня 2016 року, № 943 від 20 листопада 2019 року і № 607 від 15 липня 2020 року), які висуваються до докторських дисертацій, а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 — фізика плазми.

Завідувач кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем
Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
доктор фізико-математичних наук, професор

Ігор АНІСІМОВ

