

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 ступеня

доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми

Актуальність теми дисертації пов'язана з проблемою керованого термоядерного синтезу (КТС) та розробкою джерел плазми для різних технологій. Перспективність КТС загально визнана, і зараз у рамках міжнародного проєкту у Франції завершується будівництво експериментального пристрою ITER, на якому планується реалізувати режим термоядерного горіння, який є базовим для майбутніх термоядерних реакторів. Але розв'язання проблеми КТС не можливе без контролю та розуміння фізичних процесів, що відбуваються у плазмовому об'ємі за умов КТС. Зокрема, необхідно контролювати різні нестійкості, що можуть розвинути у плазмі. Часто саме вони визначають режими роботи пристроїв КТС і обмежують максимальні параметри плазми, що можуть бути досягнутими. Параметричні кінетичні нестійкості та пов'язана з ними дрібномасштабна турбулентність, зумовлені неоднорідностями густини та температури плазми, можуть призвести до того, що заряджені частинки, імпульс та тепло витечуть із гарячої області плазми. Між тим, в деяких джерелах плазми, наприклад геліконних джерелах плазми, розвиток нестійкостей у плазмі може сприяти нагріванню частинок плазми. Геліконні джерела плазми 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. Тема дисертації присвячена дослідженню фізики параметричних кінетичних нестійкостей та турбулентності плазми в газових розрядах і термоядерних пристроях з урахуванням реальних параметрів плазми і особливостей конструкції пристроїв, і тому вона є *актуальною*.

Дисертантом розроблено та вдосконалено числові методи, моделі і комп'ютерні коди для розрахунку параметричних кінетичних нестійкостей плазми і проведено розрахунки щодо розвитку низькочастотних параметричних кінетичних нестійкостей плазми і викликані ними турбулентності. В дисертаційній роботі наведено результати інтерпретації експериментів по створенню плазми в області іонного циклотронного резонанса в стелараторі Ураган-3М та експериментів по проникненню гвинтових збурень магнітного поля в токамаках TEXTOR (Німеччина), НУВТОК-II (Японія). Також досліджено заряджання порошинок в запорошеній геліконовій плазмі та поглинання ВЧ потужності за похилого та неоднорідного магнітного поля в плазмі геліконного джерела.

Основний зміст дисертаційної роботи складається із вступу, п'яти розділів та висновків.

У вступі обґрунтовується важливість і актуальність теми дисертаційної роботи та необхідність дослідження параметричних кінетичних нестійкостей плазми в стелараторах, токамаках та геліконних розрядах, показано зв'язок цих досліджень з науковими програмами і темами, сформульовано мету і завдання досліджень, розкрито наукову новизну одержаних результатів та їхнє практичне значення, визначено особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих разом із співавторами, наведено відомості про апробацію результатів та публікації за темою дисертації.

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, і нижню гібридну турбулентність в плазмі з іонами одного та двох сортів. Надано оцінки рівня турбулентності і швидкості турбулентного нагріву електронів та іонів і результати моделювання цих явищ. Вказано експерименти, де така турбулентність може виникати. Розроблено фізичну та числову моделі для самоузгодженого

кінетичного моделювання плазмових розрядів низького тиску з урахуванням зіткнень на основі методу частинка-у-клітці, поєднаного з методом Монте-Карло. В моделі закладена можливість використання реалістичних конфігурацій ВЧ антен, що застосовуються в експериментах, шляхом завдання кількох параметрів з урахуванням скінченних розмірів провідників антени. За допомогою комп'ютерного моделювання методом макрочастинок визначено такі важливі характеристики низькочастотної параметричної турбулентності, як швидкість турбулентного нагріву плазми та рівень її насичення.

У другому розділі розглянуто питання використання циклотронного резонансу в плазмі для розділення ізотопів. Це пов'язано з необхідністю розділення ізотопів перспективних для застосування елементів, що не мають газової фази. Це стосується, наприклад, розділення ізотопів гадолінію Gd^{157} та Gd^{155} , які мають дуже великі перерізи захоплення нейтронів і можуть бути ефективно використані в атомних реакторах в якості вигоряючої домішки, 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 відносно швидкістю різних ізотопів значення порядку їх теплової швидкості (або навіть декілька меншої) в плазмі розвиваються внаслідок параметричної нестійкості мілкомасштабні потенційні іонні циклотронні коливання з довжиною хвилі впоперек магнітного поля порядку ларморівського радіусу іонів, і поздовжньою довжиною хвилі, яка значно перевищує ларморівський радіус іонів.

У третьому розділі проведено інтерпретацію зондових вимірювань густини плазми, які було проведено в експериментах по створенню та нагріванню плазми на торсатроні Ураган-3М (Харків, Україна) електромагнітними хвилями з частотою порядку циклотронної частоти іонів. При цьому було використано кінетичну теорію електронно-іонної параметричної нестійкості плазми. Зроблено висновок, що характер вимірних частотних спектрів коливань вказує на розвиток електрон-іонної параметричної нестійкості в цих експериментах. Також представлено результати, які отримано на базі дворідинної гідродинаміки. У лінійному наближенні отримано рівняння, що описують вплив відгуку плазми на проникнення зовнішніх низькочастотних гвинтових збурень у плазму токамака (частота зовнішніх збурень не перевищує частоту електрон-іонних зіткнень). Для параметрів токамаків TEXTOR-DED та НУВТОК-II досліджено структуру гвинтового поля у плазмі, потоки плазми у цьому полі, збурення профілю току у плазмі та профіль сили, яка може обертати плазму.

У четвертому розділі представлено результати числового моделювання геліконового джерела плазми. Встановлено, що сильний градієнт неоднорідного магнітного поля в області розташування антени призводить до швидкого зростання густини плазми разом зі зростанням величини магнітного поля в аксіальному напрямку; аксіальний профіль густини плазми має пласку ділянку, яка імовірно пов'язана із наявністю локального магнітного дзеркала біля мінімуму магнітного поля; температура електронів виявляється суттєво неоднорідною в аксіальному напрямку; при несиметричному розташуванні антени в робочому об'ємі розрядної камери температура електронів значно збільшується при віддаленні від антени в сторону більш сильного магнітного поля. Також досліджено процес заряджання порошинок в низькотемпературній геліконній плазмі низького тиску під час розвитку параметричної іонно-звукової нестійкості.

У п'ятому розділі досліджено поведінку поверхневих електромагнітних хвиль в плазмі в магнітному полі, що спрямоване під кутом до поверхні плазми. Показано, що при куті нахилу магнітного поля до поверхні плазми, відмінному від нуля, дисперсійні криві значно деформуються, зокрема, зникає точка об'ємної конверсії геліконної моди і моди Гулда-Трайвелпіса. Розраховано просторовий розподіл потужності, яка поглинається в плазмі, при різних кутах нахилу магнітних силових ліній до поверхні плазми. Показано, що поглинання введеної в плазму потужності відбувається, головним чином, вздовж магнітних силових ліній. Виявлено, що глибина проникнення в плазму введеної потужності зростає разом зі зростанням кута нахилу магнітних силових ліній до поверхні плазми. Досліджено вплив неоднорідності

зовнішнього магнітного поля, яка є притаманною геліконним розрядам, на аксіальні і радіальні профілі густини плазми, поперечну і повздовжню температуру електронів, структуру хвильового електромагнітного поля і розподіл поглинання ВЧ потужності у плазмі.

Підсумовуючи, зазначу, що автор дисертації виконав різносторонні дослідження стосовно параметричних кінетичних нестійкостей та турбулентності плазми в газових розрядах і термоядерних пристроях з урахуванням реальних параметрів плазми і особливостей конструкції пристроїв. Основні результати дисертації є **новими і важливими** для розв'язання проблеми КТС та розробки високоефективних джерел плазми для різних технологій.

Особливо цікавими, на мою думку, є результати, що стосуються низькочастотної параметричної турбулентності, використання циклотронного резонансу в плазмі для розділення ізотопів, моделювання геліконового джерела плазми, а також заряджання порошинок в низькотемпературній геліконній плазмі низького тиску під час розвитку параметричної іонно-звукової нестійкості.

Достовірність та обґрунтованість результатів дисертаційної роботи не викликають сумніву, оскільки забезпечуються коректним вибором аналітичних та числових методів, співставленням результатів числового моделювання та аналітичних результатів і порівнянням з результатами експериментальних досліджень. Автор дисертації є фахівцем високого рівня в галузі числового моделювання фізичних процесів. Для отримання результатів дисертації він використав доволі складні але ефективні числові методи: методи скінченних елементів, числовий метод факторизації, неявний метод "particle-in-cell" («частинка у клітці»), метод з «нульовим зіткненням» та інші.

Результати дисертації опубліковано у 37 наукових працях, серед яких 9 статей у виданнях України, що індексуються в міжнародних наукометричних базах; 2 статті з кватилем Q3 в закордонних виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах; 5 статей з кватилем Q1 або Q2 в закордонних виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах; 21 – публікація апробаційного характеру.

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

Водночас до роботи є такі зауваження:

1. У розділі 4 ліва частина рівнянь руху електронів та іонів ((4.1b), (4.1d)) містить складові $\text{div}(n_e \mathbf{u}_e \mathbf{u}_e)$ та $\text{div}(n_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i)$ замість $n(\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u}$ (див., наприклад, Голант В. Е., Жилинський А. П., Сахаров И. Е. *Основи фізики плазми*. М., Атомиздат, 1977, 384 с. або як у рівнянні (3.9) дисертації). Було б добре пояснити, чому ці рівняння записано у такій формі.
Частина формул (4.1 a-f) вже була представлена у підрозділі 4.1.1.
2. Рис. 4.14. Показано, що поперечна температура іонів зростає за розвитку іонно-звукової параметричної нестійкості в запорошеній плазмі геліконного джерела. Між тим, у підрозділі 4.1.3 температура іонів вважається рівною 0.2 eV. Було б добре розрахувати температуру іонів у запорошеній плазмі геліконного джерела без іонно-звукової параметричної нестійкості. Також не зрозуміло, як температури іонів та електронів залежать від просторової координати за умов іонно-звукової параметричної нестійкості, що відповідають рис. 4.14.
3. Не зрозуміло чому заряд порошинок розраховується саме за іонно-звукової параметричної нестійкості в запорошеній плазмі геліконного джерела. Було б добре вказати чи є якісь експерименти стосовно цього. Було б добре дослідити як магнітне поле впливає на заряджання порошинок.
4. Стор. 210. "Нестационарність геліконного розряду в умовах розвитку іонно-звукової параметричної нестійкості збільшує амплітуду флуктуацій." Було б добре знайти амплітуду флуктуацій як функцію заряду, як зазвичай це робиться, і порівняти її з амплітудою в цьому джерелі плазми за відсутності іонно-звукової параметричної

- нестійкості і цією залежністю, здобутою попередніми авторами, що досліджували флуктуації заряду порошинок в різних розрядах.
5. Дослідження, що стосуються геліконних джерел і твердження про їх актуальність представлено у різних розділах дисертації (зокрема, в першому, четвертому та п'ятому розділах дисертації). Було б краще, якби вони були представлені в одному розділі.
 6. Інформація, що стосується числових кодів, дуже розпорошена по різних підрозділах дисертації. У деяких розділах (наприклад, у 4-му розділі) декілька підрозділів присвячено опису числових кодів. Було б добре, якби ця інформація була представлена більш компактно.
 7. В тексті зустрічаються описки та граматичні помилки. Наприклад, «рішення» краще було б замінити на «розв'язки» (ст. 31, 32), на ст. 57 у першій строчці стоїть 2 коми, замість «дорівнює фазовій швидкості» повинно бути «дорівнює фазовій швидкості» (ст. 44). У деяких місцях дробна частина числа відокремлюється від цілої комою, а в інших – крапкою. Замість «частинка-у-вічці» (ст. 85, 86) треба було написати «частинка-у-клітці».

Проте зроблені зауваження не впливають на загальну високу оцінку дисертаційної роботи. Дисертаційна робота «Параметрична кінетична нестійкість та турбулентність плазми в газових розрядах і термоядерних пристроях» виконана на високому науковому рівні та є завершеною науковою працею, в якій здобуто нові фізичні результати та зроблено чіткі висновки, а її зміст повністю відповідає науковій спеціальності 01.04.08 - фізика плазми. Автореферат повною мірою відбиває зміст дисертаційної роботи. Автореферат та дисертація оформлені згідно вимог МОН України.

За обсягом проведених досліджень, її високим рівнем, науковою новизною та практичною цінністю здобутих результатів дисертаційна робота Ольшанського В.В. «Параметрична кінетична нестійкість та турбулентність плазми в газових розрядах і термоядерних пристроях» відповідає всім вимогам МОН України щодо докторських дисертацій, а її автор, Ольшанський Валентин Васильович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми.

Денисенко Ігор Борисович,
доктор фіз.-мат. наук, професор,
професор кафедри прикладної
фізики та фізики плазми Харківського
національного університету імені В. Н. Каразіна

