

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Ольшанського Валентина Васильовича «Параметрична кінетична нестійкість та турбулентність плазми в газових розрядах і термоядерних пристроях», представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми

Дисертаційна робота В. В. Ольшанського «Параметрична кінетична нестійкість та турбулентність плазми в газових розрядах і термоядерних пристроях» присвячена дослідженню (зокрема, шляхом створення комп'ютерних кодів для числового моделювання) нелінійних процесів – параметричних нестійкостей та турбулентності – у плазмі різноманітних пристроїв: геліконних джерел плазми, установок для розділення ізотопів методом іонного циклотронного нагрівання, стелараторів тощо. В усіх цих пристроях важливу роль відіграє інжекція в плазму хвиль, створених зовнішніми джерелами. Це створює умови для розвитку різноманітних параметричних нестійкостей, які можуть впливати як на поширення хвилі, що їх породжує, так і на процеси в плазмі. Отже, актуальність обраного дисертантом напрямку роботи не викликає сумніву.

Для реалізації завдань дисертаційної роботи дисертант виконав значний об'єм досліджень, результати яких описано **в п'яти розділах**. Розгляньмо основні результати цих досліджень.

У першому розділі дисертаційної роботи розглядається параметрична турбулентність, що виникає в плазмі при її нагріванні високочастотним електромагнітним полем. Робляться оцінки рівня турбулентності різної фізичної природи (йонно-звукової, нижньогібридної, турбулентності йонних мод Бернстайна) та інтенсивності нагрівання цією турбулентністю електронів та йонів. Описано фізичну модель та числову схему, розроблені автором для моделювання таких процесів, і досить детально проаналізовано їх коректність. Подано результати комп'ютерного моделювання параметричних кінетичних нестійкостей, зокрема, параметричної йонно-циклотронної нестійкості. Знайдено основні характеристики такої нестійкості.

Темою **другого розділу** є параметричні нестійкості в пристроях для розділення ізотопів з використанням йонного циклотронного резонансу в плазмі. Дисертант описує побудовані ним кінетичну та гідродинамічну моделі плазми в таких пристроях та результати числового моделювання методом макрочастинок для практично важливих ізотопів (ізотопи літію та гадолінію, які можуть бути використані в ядерній та термоядерній енергетиці і для яких неможливо реалізувати розділення ізотопів у газовій фазі). У роботі знайдено, що після досягнення відносною швидкістю ізотопів певного критичного значення відбувається параметричне збудження певних коливань із йонно-циклотронною частотою, які впливають на ефективність розділення ізотопів за енергією.

Третій розділ присвячено розглядові нелінійних процесів у тороїдних термоядерних пристроях – стелараторах та токамаках. Автор описує результати експериментальних та теоретичних досліджень коливальних та хвильових явищ, що спостерігаються в приграничній області торсатрона Ураган-3М під час створення плазми та під час нагрівання ВЧ-розрядом в йонно-циклотронному діапазоні частот, яке супроводжується переходом до покращеного утримання. Представлено основні результати діагностичних вимірювань спектрального складу коливань, а також залежності фази та амплітуди коливань від часу та потужності ВЧ-поля, що інжектуються в плазму. Представлено також результати аналізу відгуку плазми на проникнення зовнішніх низькочастотних гвинтових збурень у плазму токамака. Розгляд ведеться на основі двоплинної гідродинаміки у лінійному наближенні. Розглянуто циліндричну та тороїдну моделі. Для параметрів токамаків TEXTOR-DED та НУВТОК-II отримано структуру гвинтового поля у плазмі, потоки плазми у цьому полі, збурення профілю струму в плазмі та профіль створеної цим збуренням сили, яка впливає на обертання плазми.

Четвертий розділ присвячується збільшенню густини плазми в геліконних джерелах шляхом оптимізації параметрів високочастотного розряду в зовнішньому полі постійного магніту. Дисертант показує, що ефективність роботи джерела плазми може бути збільшена як при використанні в джерелі неоднорідного магнітного поля. Для досягнення цієї мети дисертант побудував самоузгоджені гідродинамічну та кінетичну моделі

геліконного джерела. На основі цих моделей він розробив комп'ютерні коди та провів самоузгоджене моделювання фізичних процесів, що відбуваються в геліконних джерелах плазми з неоднорідними параметрами плазми і магнітного поля. Це дозволило вивчити реакцію температури та густини плазми на зміну геометрії магнітного поля та антени. Автор також вивчив особливості процесу заряджання порошинок у геліконній плазмі.

У **п'ятому розділі** також представлено дослідження, спрямовані на підвищення ефективності геліконного джерела. На відміну від четвертого розділу, вивчається залежність поглинання високочастотної потужності плазмою від кута нахилу магнітних силових ліній до поверхні плазми. Автором знайдено, що проникнення високочастотної хвилі всередину плазми відбувається, головним чином, вздовж магнітних силових ліній, що визначає форму області, в якій відбувається поглинання введеної в плазму потужності. Виявлено також, що глибина проникнення в плазму введеної потужності зростає разом зі зростанням кута нахилу магнітних силових ліній до поверхні плазми.

Розгляд тексту дисертаційної роботи веде до висновку, що вона є завершеною роботою. У ній представлено цікаві нові результати, які в сукупності є достатніми, щоб стверджувати про значне досягнення для теорії параметричних нестійкостей у плазмових системах. Серед нових результатів хотілося б відзначити, насамперед, такі:

1. Розроблено нову числову схему та відповідний комп'ютерний код, які ґрунтуються на поєднанні методу частинка-сітка та методу Монте-Карло, для самоузгодженого моделювання параметричних нестійкостей у розрядах низького тиску.

2. Знайдено, що в пристроях для розділення ізотопів методом йонно-циклотронного нагрівання плазми при досягненні відносною швидкістю ізотопів певного значення можуть розвиватися йонно-циклотронні коливання, що суттєво погіршують ефективність цього методу.

3. Проведено числове моделювання геліконного джерела йонів з використанням двовимірного самоузгодженого числового коду і досліджено вплив неоднорідності магнітного поля та кута нахилу його силових ліній до поверхні плазми на ефективність джерела.

Достовірність та обґрунтованість результатів дисертаційної роботи не викликають у мене сумніву, оскільки забезпечуються коректним вибором аналітичних та числових математичних методів, співставленням аналітичних та числових результатів і порівнянням з результатами експериментальних досліджень у тих випадках, коли це є можливим.

Результати дисертаційної роботи, поза сумнівом, мають практичне значення. Зокрема, вони є корисними для інтерпретації експериментів зі створення та нагрівання плазми в стелараторах, експериментів на токамаках, де використовуються зовнішні гвинтові збурення, та для розробки геліконних джерел плазми. Гадаю, що одержані в роботі наукові результати можуть знайти застосування в Інституті ядерних досліджень НАН України, в Інституті фізики НАН України, в Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» та в інших наукових установах України, а також у наукових установах, з якими Україна пов'язана в консорціумі EUROfusion, зокрема, в Інституті фізики плазми Макса Планка (Німеччина), спільному європейському пристрої JET, Національній термоядерній лабораторії (Іспанія).

До недоліків роботи слід віднести таке:

1. У підрозділі 3.2, темою якого є динаміка резонансних магнітних збурень, як мені здається, варто було б обговорити роль швидких йонів та умови, за яких їх невключення до моделі є виправданим. Відомо, що такі збурення здатні викликати підсилені втрати швидких йонів, а, з іншого боку, втрати швидких йонів здатні впливати на електричне поле біля границі плазми. Утім, це зауваження є, скоріше, побажанням на майбутнє.

2. На мій погляд, у розділах 4 та 5 дисертації, які присвячені моделюванню процесів у геліконних джерелах плазми, недостатньо ясно окреслено відмінності та подібності у цілях дослідження, моделях, що застосовуються, та в отриманих результатах. Якби таке порівняння було зроблено, це значно полегшило б сприйняття результатів дисертації.

3. На жаль, в тексті автореферату та дисертації є чимало друкарських, лексичних та граматичних помилок. Як приклади, наведу «відповідність результатів, які дають цією моделлю переносу» (дисертація, стор. 56), «визначаються з умови ..., з якого витікає» (стор. 67), систематичне вживання

слова «вірогідність» замість «імовірність», «ток» замість «струм», «зіштовхувальний» замість «зіткненневий», «безперервний» замість «неперервний». Мені здається, що можна говорити про неявну числову модель, але не про «неявну фізичну та числову моделі» (дисертація, стор. 4). Я так і не зміг збагнути зміст речення «відповідна фізика може охоплювати більше десяти десятиліть у часі та просторі» (стор. 30). З іншого боку, ці мовні огріхи не заважають розуміти зміст тексту; у цілому мова та стиль викладення в роботі є достатньо ясними та зрозумілими.

Я вважаю, що зазначені недоліки не ставлять під питання достовірність та обґрунтованість основних положень, що виносяться на захист, і не впливають на загальний високий рівень наукових досліджень, представлених у дисертації. У цілому дисертація справила на мене позитивне враження. Наукові результати, що увійшли до дисертаційної роботи, з достатньою повнотою викладено в 37 наукових працях, зокрема, в 9 статтях у виданнях України, що індексуються в міжнародних наукометричних базах, 2 статтях в зарубіжних виданнях з квантилем Q3 в міжнародних наукометричних базах та 5 статтях в зарубіжних виданнях з квантилів Q1 та Q2. Вони неодноразово доповідалися на міжнародних та українських конференціях із фізики плазми та фізики прискорювачів. Частину робіт виконано здобувачем одноосібно, а його особистий внесок у дослідження, виконані в співавторстві, є значним. Результати цих робіт не виносилися на здобувачем на захист його кандидатської дисертації, оскільки їх було опубліковано пізніше того захисту.

У цілому стиль викладення та мова дисертації є чіткими та зрозумілими. Автореферат дисертації правильно та з достатньою повнотою відображає матеріали дисертаційної роботи, основні результати та висновки, ступінь їх наукової значимості й новизни. Тема дисертації відповідає спеціальності 01.04.08 – фізика плазми.

Взявши до уваги наведене вище, можу констатувати, що дисертаційна робота В. В. Ольшанського «Параметрична кінетична нестійкість та турбулентність плазми в газових розрядах і термоядерних пристроях» є завершеною працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що в сукупності є значним досягненням для розвитку теорії параметричних нестійкостей у плазмових системах, а також

для оптимізації таких систем. Вважаю, що дисертаційна робота відповідає всім вимогам, що висуваються до таких робіт у «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженому постановами уряду України, а її автор, Ольшанський Валентин Васильович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

Доктор фіз.-мат. наук, с.н.с.,
провідний науковий співробітник
відділу теорії ядерного синтезу
Інституту ядерних досліджень
НАН України

Ю. В. Яковенко

Підпис Ю. В. Яковенка засвідчую

Вчений секретар
ІЯД НАН України



Н. Л. Дорошко