

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Тихого Антона Володимировича "Хвильові процеси та транспорт надтеплових іонів у квазіізодинамічних стелараторах", подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми

**Актуальність теми.** Дисертаційна робота виконана в Інституті ядерних досліджень НАН України і стосується проблем хвильових і транспортних процесів в установках стелараторного типу. Актуальність теми дисертації пов'язана с перспективами стелараторів в якості пристроїв керованого термоядерного синтезу (КТС). Через це стають актуальними дослідження, спрямовані на оптимізацію термоядерного реактора-стеларатора та поліпшення його характеристик. Отримані результати застосовано до таких конкретних термоядерних систем як стеларатор Wendelstein 7-X (Німеччина), реактора-стеларатора Helias (ЄС, міжнародний проект) та гвинтовий пристрій LHD (Японія). В названих системах плазма містить надтеплові іони, що утворюються внаслідок інжекції нейтральних атомів та внаслідок термоядерних реакцій. Як відомо, поведінка надтеплових іонів суттєво впливає на характеристики плазми в усіх без винятку термоядерних пристроях із магнітним утриманням. Більше того, погане утримання продуктів термоядерних реакцій, наприклад,  $\alpha$ -частинок, у традиційних стелараторах унеможливорює їх використання як термоядерних реакторів, що стимулює розвиток новітніх концепцій стелараторних систем (оптимізовані стеларатори, модульні стеларатори, стеларатори з квазігвинтовою симетрією, стеларатори з квазіосьовою симетрією і т.п.). Тому вивченню фізичних процесів у плазмі з надтепловими іонами приділяється велика увага як теоретиків, так і експериментаторів у багатьох лабораторіях світу.

**Структура та зміст дисертації.** Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку літератури. Повний обсяг дисертації складає 159 сторінок включаючи 17 рисунків. Список використаних літературних джерел налічує 92 найменування. Результати роботи опубліковані в 7 реферованих журналах (5 закордонних, 2 вітчизняних) и доповідалися на 7 міжнародних конференціях з Фізики Плазми та Керованого Термоядерного Синтезу.

У ВСТУПІ обґрунтовано актуальність виконаних у дисертаційній роботі досліджень, обговорюється наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, вказується особистий внесок здобувача в наукових працях і відомості про апробацію результатів.

У ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ описано транспорт надтеплових іонів у стелараторах. В першому підрозділі 1.1 цього розділу застосовано комбінований лагранжево-гамільтоновий формалізм для опису дрейфового руху заряджених частинок у 3D стелараторному магнітному полі. Цей формалізм використано для відшукування адіабатичних інваріантів (інтегралів збереження) при русі пролітних та захоплених частинок вздовж утримуючого магнітного поля за допомогою гіроусередненого лагранжіана, записаного в бузерових магнітних координатах. При цьому індукція стаціонарного магнітного поля штучно розділяється на основну компоненту, яка має високу симетрію в бузерових координатах, та решту компонент, які розглядаються як збурення.



У підрозділі 1.2 той самий формалізм застосовано для опису беззіткненнястохастичної дифузії перехідних надтеплових іонів, пов'язаної із їх перетвореннями із локально пролітних на локально захоплені і навпаки. Такі іони складають значну частину популяції захоплених іонів у стелараторах типу Wendelstein і Helias. Показано, що стохастична дифузія може виникати через незкорельовані стрибки поздовжнього адіабатичного інваріанту частинки при переході через сепаратрису між областями фазового простору, що відповідають локально пролітним та локально захопленим частинкам. Доведено, що обчислені коефіцієнти стохастичної дифузії виявляються в кілька разів більшими, ніж попередні оцінки, що спирались на спрощені методи врахунку стрибків, що важливо для оцінки впливу цього механізму дифузії на утримання перехідних частинок.

У *ДРУГОМУ РОЗДІЛІ* розглядається вплив радіального електричного поля на утримання надтеплових іонів. У підрозділі 2.1 за допомогою якісного аналізу баунс-усереднених рівнянь руху локально захоплених надтеплових іонів отримано умови їх доброго утримання у стелараторах, коли в стаціонарному магнітному полі домінує дзеркальна гармоніка. Наявність радіального електричного поля забезпечує існування резонансного значення частоти пов'язаного з електричним полем обертання плазми, яке приводить до розімкнення дрейфових орбіт частинок і швидкої їх втрати. Оскільки вплив радіального електричного поля на дрейф частинок залежить від їх енергії, то заданому електричному полю відповідає певне резонансне значення енергії частинок, за якого вони не утримуються. Цей резонанс є досить широким, тому описаний ефект існує навіть тоді, коли використані наближення не є точними, що узгоджується з результатами числового моделювання орбіт частинок кодом ORBIS. Додатне електричне поле, яке задовольняє резонансній умові для  $\alpha$ -частинок із енергіями  $T \ll \mathcal{E} \ll 3.5$  MeV, може бути корисним для видалення  $\alpha$ -частинок із плазми реактора Helias. Також показано, що присутність від'ємного електричного поля сприяє утриманню захоплених іонів, якщо їх енергія не перевищує певної величини; додатне ж електричне поле погіршує їх утримання. Більш того, електричне поле, локалізоване у кільці (тобто у певному інтервалі за радіусом плазми) може грати роль транспортного бар'єра для надтеплових іонів.

У підрозділі 2.2 описано метод зменшення дифузійних втрат іонів за рахунок замкнення сепаратриси між локально пролітними та локально захопленими частинками всередині об'єму плазми. Показано, що в оптимізованих стелараторах можна мінімізувати швидкі втрати надтеплових іонів завдяки спеціальному підбору такої конфігурації магнітного поля, в якій дрейфові траєкторії частинок замкнені всередині об'єму плазми. Якщо модифікувати плазмову конфігурацію таким чином, щоб не лише лінії рівня поздовжнього адіабатичного інваріанту, а й сепаратриса, були замкнені всередині плазми, втрат частинок вдасться уникнути і стохастична дифузія приводитиме лише до перерозподілу надтеплових іонів всередині об'єму плазми. Цей критерій простий для обчислення і може застосовуватись як додатковий при оптимізації плазмових конфігурацій в стелараторах. Показано, що в стелараторах типу Wendelstein діамagnetизм плазми та від'ємне радіальне електричне поле сприяють замкненню сепаратрис, а збільшення амплітуд Фур'є-компонент магнітного поля - їх розімкненню. Додатні електричні поля, які погіршують утримання надтеплових частинок, також можуть бути корисними, бо вплив електричних полів на утримання швидко падає з ростом



енергії частинок. Цей ефект також може бути корисним для видалення гелієвого попелу із центральних областей плазми у реакторах-стелараторах.

У *ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ* досліджено умови альфвенових резонансів в стелараторній плазмі. У підрозділі 3.1 виведено загальні формули для декрементів/інкрементів, пов'язаних із механізмом Ландау, які доповнюють відомі результати урахуванням кінетичних ефектів основної плазми та її стисливості. Показано, що згасання Ландау альфвенових мод відіграє важливу роль у стелараторах. При низькому  $\beta$ , згасання Ландау сильно стабілізує альвенові власні моди, пов'язані з тороїдальністю (ТАЕ) та ізомонні моди. При високому  $\beta$  згасання Ландау на іонах велике не лише для ТАЕ, а й для гвинтових (НАЕ) та дзеркальних (МАЕ) мод. Проведено аналіз ізомонних та ТАЕ-мод у планованих експериментах з інжекцією нейтральних пучків на Wendelstein 7-X. Цей аналіз показав, що декремент згасання ізомонних мод може перевищувати їх інкремент, викликаний пролітними інжекткованими іонами. Показано також, що розвинена теорія узгоджується з експериментом на LHD, де спостерігалися ТАЕ-моди.

У підрозділі 3.2 розглядається збудження альфвенової температурно-градієнтної нестійкості плазми, яка супроводжується доцентровим потоком енергії. Показано, що дестабілізуючий вплив просторової неоднорідності основної плазми з максвеловим розподілом швидкостей на альфвенові моди в тороїдальних системах може перебороти їх згасання через механізм Ландау. Отримана необхідна умова дестабілізації альфвенової температурно-градієнтної нестійкості, яка суттєво залежить від резонансної швидкості надтеплових частинок  $v_{\parallel}^{res} \approx (2 \div 3)v_T$ . У стелараторах відповідні резонансні швидкості можуть існувати за рахунок неосесиметричних резонансів, які виникають через відсутність у стелараторах осової симетрії і можуть приводити до взаємодії альфвенових мод та іонів із швидкостями, значно меншими за резонансні швидкості в токамаках.

У підрозділі 3.3 досліджено перенесення енергії збудженими альфвеновими власними модами поперек магнітного поля. У пункті 3.3.2 цього підрозділу виводяться та аналізуються загальні рівняння для потоку енергії в моді. У пункті 3.3.3 розглядаються модельні та конкретні приклади для випадку однієї альфвенової моди. Вирази для потоку енергії виведено із рівняння балансу енергії за умови, що радіальний профіль моди не змінюється в ході нестійкості. Показано, що потік енергії можна розділити на дві частини, одна з яких ( $S_{mode}$ ) постачає енергію, що переходить у зростання амплітуди моди в областях, де мода збуджується слабо або взагалі не збуджується, а інша ( $S_{heat}$ ) нагріває плазму в областях, де домінує згасання, і відповідає за просторове каналювання. Показано, що у нестійких плазмах потік енергії поперек магнітного поля існує навіть за відсутності просторового каналювання, тобто коли згасання моди нехтовне або коли область, де мода згасає, співпадає з областю, де вона збуджується. Цей потік відповідає за обмін енергією між збуреннями плазми на різних магнітних поверхнях – власне, можна сказати, що він відповідає за саме існування моди – а при великих амплітудах чи великих інкрементах нестійкості він може змінювати її форму. Аналіз проведено для альфвенових мод, але загальні формули справедливі і для швидких магнітозвукових мод.

### ***Наукова новизна отриманих результатів.***

1. Вперше показано можливість збудження альфвенових власних мод градієнтом температури іонів в неосесиметричних системах.



2. Запропоновано інтерпретацію експерименту на стелараторі Wendelstein 7-X, в якому спостерігалися довготривалі високочастотні коливання.

3. Вперше показано, що величина, напрямок та радіальний розподіл потоку енергії, що переноситься збудженими модами, залежить від інкременту нестійкості і взаємного розташування областей, де мода збуджується та згасає.

4. Вперше обчислено коефіцієнти стохастичної дифузії перехідних частинок у оптимізованих стелараторах з використанням реалістичної геометрії фазового простору частинок.

5. Вперше виявлено ключову роль механізму згасання Ландау у стабілізації тороїдальних альфвенових власних мод та ізомонних мод у стелараторах.

**Практичне значення отриманих результатів.** Роботи дисертанта, на основі яких написана дисертація, включають як теоретичні дослідження, так і застосування розвиненої теорії до конкретних термоядерних систем: стеларатор Wendelstein 7-X, реактор-стеларатор Helias та гвинтовий пристрій LHD (Японія).

Побудована теорія збудження альфвенових нестійкостей плазми градієнтом іонної температури знайшла застосування для інтерпретації одного з перших експериментів на стелараторі Wendelstein 7-X.

Показано, що стохастична дифузія перехідних частинок у стелараторах типу Wendelstein та реакторі-стелараторі Helias є у кілька разів сильнішою, ніж передбачалося раніше, завдяки створюваній магнітним полем асиметрії між локально пролітними частинками із протилежними знаками поздовжньої швидкості.

Запропоновано метод послаблення негативного впливу стохастичної дифузії на утримання надтеплових іонів шляхом замикання сепаратрис між локально пролітними та локально захопленими орбітами всередині плазми.

Показано можливість використання від'ємного радіального електричного поля для поліпшення утримання локально захоплених надтеплових іонів.

**Зауваження до роботи.** Водночас дисертаційна робота містить ряд зауважень, головним чином, редакторського спрямування, до яких треба віднести наступне:

1) В рівняннях (1.23) і (1.24) відсутні визначення характерних частот  $\omega_b$ ,  $\omega_V$ ,  $\omega_p$  і  $\omega_{b0}$ .

2) По тексту відсутня однаковість в позначеннях для маси частинок (і  $M$ , і  $m$ ), для магнітного моменту (і  $\mu$ , і  $\mu_p$ ) При цьому  $\mu$  означає і цілочисельні числа.

3) На стор. 40 при комбінуванні дзеркальної та гвинтової гармонік без пояснень вводиться нова кутова зміна  $\chi$ . Виникає питання про функціональний зв'язок між  $\chi$  і  $\theta$ .

4) На Рис. 1.2 і на Рис. 2.1 наведено графіки величини  $J_{||}$ , яка не визначена раніше.

5) На стор. 60 недостатньо пояснень із якою точністю виконується закон збереження магнітного моменту.

6) На стор. 60 оператор  $\nabla_{\perp}$  не визначений.

7) На стор. 68 в рівняннях (2.38)-(2.42) вводиться циклотронна частота  $\omega_b$  без пояснень, від яких змінних (від яких координат) вона залежить.

8) На стор. 72. зроблено важливий висновок про те, що від'ємне електричне поле сприяє утриманню локально захоплених іонів в стелараторі. При цьому немає пояснень про вплив такого поля на утримання локально захоплених електронів.



9) На стор. 88 в рівнянні (3.4) наведено умови резонансної взаємодії між хвилями і пролітними частинками. При цьому виникає питання про вплив захоплених частинок на дисипацію і збудження альфвенових хвиль в стелараторній плазмі.

10) На стор. 89 альфвенова швидкість не визначена. Не ясно, через яке магнітне поле визначається  $v_A(r)$ .

11) У рівнянні (3.23), стор. 96, для ізомонних мод є присутнім поздовжній рівноважний електричний струм. При цьому немає роз'яснень як пов'язані між собою рівноважний струм і рівноважна (максвеллівська) функція розподілу частинок плазми в стелараторі.

12) На стор. 101 недостатньо роз'яснень, що мається на увазі під параметрами  $\chi_0$  і  $\nu_0$  в рівнянні (3.38) при визначенні функції розподілу надтеплових іонів.

13) Параметр  $k_\theta$  на стор. 103 не визначений. Можливо, тут замість  $k_\theta$  повинна бути бінормальна проекція хвильового вектора.

14) На стор. 109 треба пояснити яке відношення має частота  $f$  до рівняння (3.35).

15) При обчисленні ВЧ-потужності в плазмі дисертантом використано одномодове наближення зв'язку полоїдальних гармонік електричного поля і щільності електричного струму. Проте у токамаках, відомо, що весь спектр полоїдальних гармонік  $E$ -поля,  $E_{\parallel}(\theta) = \sum_{m'} E_{\parallel}^{(m')} e^{im'\theta}$ , дає внесок в  $m$ -гармоніку

$J_{\parallel}^{(m)} = \sum_{m'} \sigma_{\parallel}^{m,m'} E_{\parallel}^{(m')}$ . Виникає питання, чому в стелараторі цей ефект не враховується.

Однак, наведені зауваження ні в якому разі не впливають на достовірність основних результатів й висновків дисертаційної роботи.

#### ***Відповідність дисертації встановленим вимогам та оцінка в цілому.***

Роботу виконано на високому науковому рівні, стиль викладення відповідає такому, що використовується в науковій літературі. Тема дисертації відповідає спеціальності 01.04.08 – фізика плазми. Зміст автореферату є ідентичним до основних положень дисертації. Отримані результати сприяли узагальненню опису оптимізованих плазмових систем стелараторного типу, а також пояснили ряд експериментальних спостережень на стелараторі Wendelstein 7-X (Німеччина) та на пристрої LHD (Японія). Вони рекомендуються для використання в ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут», Інституті ядерних досліджень НАН України, в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна, в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, Інституті фізики НАН України, в Інституті фізики плазми Макса Планка (Німеччина) та Національному інституті термоядерних досліджень (Японія).

До безперечних достоїнств дисертації відноситься те, що у роботі з'ясовано особливості транспорту надтеплових іонів у стелараторах, зокрема розроблено числові коди для опису перехідних частинок в оптимізованих стелараторах типу Wendelstein і Helias, отримано умови збудження та згасання альфвенових нестійкостей у плазмі таких стелараторів, та вивчено перенесення енергії плазми поперек магнітного поля, пов'язане з нестійкостями хвиль альфвенового типу.

З вищесказаного можна зробити висновок, що дисертація Тихого Антона Володимировича "Хвильові процеси та транспорт надтеплових іонів у



квазіізодинамічних стелараторах" є закінченою науково-дослідною роботою, в якій досліджено широке коло процесів пов'язаних з резонансною взаємодією надтеплових іонів із хвилями альфвеновського типу в плазмі стелараторів. Отримані автором нові, науково обґрунтовані результати в сукупності є важливими в першу чергу для кінетичного опису пролітних і захоплених частинок в 3D стелараторних магнітних полях, що застосовується для оптимізації режимів утримання і нагрівання плазми, а також для опису транспортних процесів у реакторах-стелараторах.

Вважаю, що дисертаційна робота Тихого А.В. повністю задовольняє вимогам Департаменту атестації кадрів Міністерства освіти і науки України щодо кандидатської дисертації, а її автор заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

Доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
професор кафедри фізики Українського  
державного університету залізничного транспорту



Особистий підпис  
засвідчую \_\_\_\_\_ 20 \_\_ р.  
Завідуючий канцелярією  
УкрДУЗТ

М.І. Гришанов

*М. І. Гришанов*  
*Олександр Олександрович*