

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 дисертації.

Стеларатори є одним із двох перспективних типів пристроїв для магнітного утримання термоядерної плазми. Конфігурації магнітного поля, характерні для ранніх конструкцій стелараторів, не утримували надтеплові іони, зокрема продукти термоядерних реакцій – альфа-частинки, що ускладнювало їх використання для отримання термоядерної енергії і стимулювало розвиток новітніх концепцій оптимізованих стелараторів – стеларатори із квазігвинтовою та квазіосьовою симетрією, а також квазіізодинамічні стеларатори. Саме на стелараторах останнього типу нещодавно були досягнуті рекордні для стелараторів показники температури, тиску та часу утримання плазми. Проте і у цих стелараторах проблема утримання надтеплових іонів вирішена лише частково.

Добре утримання надтеплових іонів є критично важливим для забезпечення енергетичного балансу термоядерних реакторів. Крім цього, надтеплові іони впливають на процеси в плазмі завдяки можливості збудження ними плазмових нестійкостей. Надтеплові іони утворюються у термоядерних пристроях як продукти термоядерних реакцій, внаслідок інжекції нейтральних пучків та взаємодії з високочастотними полями.

Таким чином, вивчення транспорту надтеплових іонів та їх впливу на плазмові процеси у квазіізодинамічних стелараторах є актуальними та належить до ключових напрямків досліджень з керованого термоядерного синтезу. Саме цій темі присвячена дисертаційна робота А.В. Тихого.

Загальна характеристика роботи.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 3 розділів основного тексту з 17 рисунками та 2 таблицями, висновків, списку використаних джерел (92 найменування) та 2 додатків, усього 159 сторінок.

У вступі викладенні актуальність теми дисертації, новизна здобутих результатів, мета та задачі дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами та планами, обґрунтованість та достовірність наукових положень і висновків, висвітлений особистий внесок здобувача та наведено відомості про апробацію результатів дисертації.

Перший розділ присвячено вивченню запропонованою автором моделі стохастичної (беззіткненої) дифузії надтеплових іонів, яка є основним каналом втрат частково замкнених іонів у квазіізодинамічних стелараторах. За допомогою комбінованого лагранжево-гамільтонова формалізму розвинена теорія стохастичної дифузії перехідних іонів у стелараторах, що враховує створювану магнітним полем асиметрію між локально пролітними частинками із протилежними знаками поздовжньої швидкості, та знайдено нові вирази для адіабатичних інваріантів руху локально захоплених та локально пролітних іонів.

У другому розділі за допомогою якісного аналізу баунс-усереднених рівнянь руху локально захоплених надтеплових іонів виводяться умови їх доброго утримання у стелараторах, в магнітному полі яких домінує дзеркальна (пробко тронна) гармоніка. Запропоновано метод послаблення негативного впливу стохастичної дифузії на утримання іонів в оптимізованих стелараторах за рахунок модифікацій магнітної конфігурації та використання від'ємного радіального електричного поля, а також розглянуто вплив електричного поля на утримання локально захоплених частинок. Показано існування певних резонансних значень частоти пов'язаного з електричним полем жорсткого обертання плазми, за яких такі частинки не утримуються.

Третій розділ присвячено впливу надтеплових іонів на збудження та загасання альфвенових нестійкостей у стелараторах. Розвинено теорію, з якої випливає, що дестабілізуючий вплив просторової неоднорідності основної плазми з максвеловим розподілом швидкостей на альфвенові власні моди в тороїдальних системах може перебороти їх згасання через механізм Ландау, та отримано необхідну умову дестабілізації моди. Показано, що за певних умов збуджувані

градієнтом температури іонів нестійкості можуть приводити до доцентрового просторового перекачування енергії плазми. Крім цього, у третьому розділі дисертації досліджено перенесення енергії збудженими альфвеновими власними модами поперек магнітного поля.

Робота вмотивована та істотно зв'язана з сучасними експериментальними дослідженнями на стелараторах. Вона виконана на найвищому світовому рівні.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі, забезпечений правильним використанням загальноприйнятих теоретичних методів математичної фізики та фізики плазми, порівнянням отриманих результатів із експериментальними даними та результатами інших авторів.

Дисертаційне дослідження відповідає паспорту наукової спеціальності 01.04.08 – фізика плазми.

Наукові положення та висновки, подані у дисертаційній роботі, є достатньо і належним чином обґрунтованими.

Оцінка новизни та достовірності результатів.

У дисертаційній роботі отримано низку нових, цікавих та практично важливих результатів, частина з яких отримана вперше у світі, а саме:

Виявлено сильний стабілізуючий вплив згасання Ландау на альфвеніві та ізомонні моди у стелараторах.

Показано можливість збудження альфвенових власних мод градієнтом температури іонів в неосесиметричних системах. Запропоновано інтерпретацію експерименту на Wendelstein 7-X, в якому спостерігалися довготривалі високочастотні коливання, на основі цього механізму.

Показано, що сила та напрямок потоку енергії, що переноситься збудженими альфвеновими модами поперек магнітного поля, залежить від інкременту нестійкості і взаємного розташування областей, де мода збуджується та згасає.

Розвинено теорію стохастичної дифузії перехідних частинок у квазіізодинамічних стелараторах, яка ґрунтується на застосуванні теорії переходу через сепаратрису до стелараторної геометрії магнітного поля. Запропоновано

новий метод послаблення шкідливого впливу стохастичної дифузії за рахунок замкнення сепаратрис усередині плазми.

Повнота викладу результатів роботи в опублікованих працях.

Результати дисертації повністю опубліковано у 7 працях у провідних міжнародних спеціалізованих фахових журналах з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (2 у «Physics of Plasmas» та 2 у «Plasma Physics and Controlled Fusion») та у міжнародних і вітчизняних загальнофізичних фахових журналах (2 в «Українському фізичному журналі» та 1 у «Physics Letters A»). Результати дисертації пройшли апробацію на 7 міжнародних та вітчизняних конференціях.

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

Зауваження по дисертаційній роботі в цілому.

Є декілька зауважень невеликих зауважень до дисертаційної роботи. Хоч вона написана на «легкій» українській мові, її не дуже легко читати через недостатні пояснення. Наприклад, на стор. 2 термін «резонансна швидкість» не пояснений. Неясно, що таке «неосесиметричні резонанси» (стор.3). Є неточні висловлення, наприклад «Сучасний стан термоядерних досліджень характеризується проведенням широкого фронту робіт на термоядерних пристроях різних типів» (стор. 17); «- знайти умови дестабілізації альфвенових нестійкостей ...» (стор. 20), «...і нагрівання на іонному циклотронному резонансі (Ion Cyclotron Resonance Heating, ICRH)...» (стор. 58). Здається невдалим термін «дзеркальна гармоніка», що є прямим перекладом з англійської мови: краще було б «пробкотронна гармоніка». Термін «пітч-кутовий параметр» пояснений багато разів. Цим словосполученням позначені дві споріднені, але різні параметри (α і λ). В тексті дисертації вживаються два різних слова для одного предмету: «іон» та «йон».

Однак вказані недоліки не знижують загальної високої оцінки дисертаційної роботи, виконаної на найвищому науковому рівні.

Висновок.

Дисертаційна робота «Хвильові процеси та транспорт надтеплових іонів у квазіізодинамічних стелараторах» виконана на високому світовому рівні та є завершеною науковою працею, в якій здобуто нові теоретичні 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 Атестаційної колегії Міністерства освіти та науки України.

За обсягом проведених досліджень, їх високим рівнем, науковою новизною та практичною цінністю здобутих результатів дисертаційна робота «Хвильові процеси та транспорт надтеплових іонів у квазіізодинамічних стелараторах» 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), які висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

Офіційний опонент

Завідувач відділу стелараторів

ІФП ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

кандидат фізико-математичних наук

старший науковий співробітник



В.Є. Моїсеєнко

Підпис Моїсеєнка В.Є. засвідчую

Заступник генерального директора

ННЦ ХФТІ НАН України



В.Є. Гаркуша

31.05.2019