

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА

Тихий Антон Володимирович

УДК 533.9

**ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ ТА ТРАНСПОРТ НАДТЕПЛОВИХ ІОНІВ
У КВАЗИІЗОДИНАМІЧНИХ СТЕЛАРАТОРАХ**

01.04.08 — фізика плазми

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків — 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті ядерних досліджень НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Колесниченко Ярослав Іванович,
Інститут ядерних досліджень НАН України,
завідувач відділу теорії ядерного синтезу.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник
Гришанов Микола Іванович,
Український державний університет залізничного
транспорту МОН України (м. Харків), професор
кафедри фізики;
кандидат фізико-математичних наук
Моїсєєнко Володимир Євгенович,
Інститут фізики плазми Національного наукового
центру «Харківський фізико-технічний інститут»
НАН України (м. Харків), завідувач відділу
стелараторів.

Захист відбудеться «___» _____ 2019 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського Національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61108, м. Харків, пр-т Курчатова, 31, ауд. 301.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського Національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий «___» _____ 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. Г. Гах

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Останні роки позначилися прогресом на шляху до комерційного застосування термоядерної енергії. У 2015 році у Німеччині було завершено спорудження стеларатора Wendelstein 7-X – найбільшого у світі оптимізованого стеларатора [Klinger et al., Plasma Phys. Control. Fusion **59** (2017) 014018].

У Франції триває будівництво ITER, міжнародного реактора типу токамак. Кількома роками раніше було пройдено ключові рубежі на шляху до мети термоядерних досліджень. Зокрема, на токамаках JET (ЄС), TFTR (США), JT-60U (Японія) було досягнуто температуру плазми понад 100 мільйонів градусів, необхідну для комерційного застосування термоядерної енергії, та проведено експерименти зі справжнім термоядерним паливом – сумішшю дейтерію та тритію (JET, TFTR) [Kikuchi, Lackner, Tran. Fusion Physics. IAEA, Vienna, 2012].

Зростає роль міжнародної співпраці у термоядерних дослідженнях. Наразі зусилля термоядерних лабораторій ЄС об'єднані в рамках Консорціуму EUROfusion, до якого Україна нещодавно долучилась асоційованим членом. Опублікована Європейська дорожня карта до термоядерної електроенергії, згідно з якою термоядерні електростанції мають запрацювати на початку другої половини цього століття.

Перехід до термоядерної епохи дасть змогу забезпечити людство практично невичерпним джерелом енергії з мінімальним впливом на довкілля. З наближенням цієї епохи, проблема ціни виробленої енергії стає дедалі важливішою. Через це стають актуальними дослідження, спрямовані на оптимізацію реактора та поліпшення його характеристик.

Сучасний стан термоядерних досліджень характеризується проведенням широкого фронту робіт на термоядерних пристроях різних типів. Зокрема, крім токамаків, що лишаються лідерами з багатьох досягнутих параметрів, значного прогресу досягнуто на стелараторах та сферичних торах (останні є рекордсменами з досягнутого параметра β (β – відношення тиску плазми до тиску магнітного поля)).

Останнім часом у термоядерних дослідженнях усе більша увага приділяється стелараторам — пристроям для магнітного утримання плазми, які, подібно до токамаків, мають тороїдальну топологію магнітного поля, але, на відміну від останніх, мають складну гвинтову форму. Основною перевагою стелараторів перед токамаками є те, що в них потрібна топологія

магнітного поля утворюється без участі поздовжнього електричного струму плазми. Це, з одного боку, полегшує створення реактора, що працює неперервно, а з іншого боку, дає змогу подолати нестійкості, пов'язані з поздовжнім струмом плазми, включно з дуже небезпечною нестійкістю зриву.

В усіх названих системах плазма містить надтеплові іони, що утворюються внаслідок інжекції нейтральних атомів, прискорення при ВЧ нагріванні плазми, а також внаслідок термоядерних реакцій. Поведінка надтеплових іонів суттєво впливає на характеристики плазми в усіх без винятку термоядерних пристроях. Тому вивченню фізичних процесів у плазмі з надтепловими іонами приділяється велика увага як теоретиків, так і експериментаторів у багатьох лабораторіях світу.

Зокрема виявилося, що у традиційних стелараторах, які розробляли у 1970-х роках, переважна частка альфа-частинок — продуктів термоядерних реакцій, захоплених у локальні магнітні ями, втрачалася б за час порядку дрейфового, який є набагато меншим, ніж час заповільнення. Оскільки локальні магнітні ями у стелараторах існують у всьому об'ємі плазми, ці швидкі втрати унеможливають використання таких пристроїв як термоядерних реакторів. Це стимулювало інтерес до дослідження утримання надтеплових іонів у стелараторах і спричинилося до розвитку новітніх концепцій стелараторних систем (стеларатори з квазігвинтовою симетрією, стеларатори з квазіосьовою симетрією, квазіізодинамічні стеларатори і т.п.), які отримали загальну назву оптимізованих стелараторів. У цих системах магнітне поле влаштоване таким чином, що у відсутності зіткнень орбіти частинок є близькими до магнітних поверхонь. У квазісиметричних стелараторах цього досягають завдяки тому, що індукція магнітного поля має наближену гвинтову або тороїдальну симетрію у потокових координатах. Більш загальний підхід, відомий як квазіомнігенність або квазіізодинамічність, вимагає, щоб лінії рівня адіабатичних інваріантів руху надтеплових частинок були близькими до магнітних поверхонь; ця умова є одним із критеріїв оптимізації конфігурації магнітного поля пристрою. Саме цей підхід використано у стелараторі Wendelstein 7-X та у концептуальних проектах реакторів-стелараторів Helias, які є основними пристроями, що розглядаються у дисертаційній роботі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дослідження, що ввійшли до дисертаційної роботи, виконувалися

в рамках тем Національної Академії наук України № 0104U003882 “Нестійкості плазми та транспорт іонів високих енергій у стелараторах, сферичних торах та токамаках” (2004-2006 pp.), № 0106U011414 “Коллективні явища та транспортні процеси в плазмі тороїдальних систем” (2007-2011 pp.) та № 0116U002923 “Багаточастинкові процеси в термоядерних системах” (2017-2021 pp.), партнерського проекту УНТЦ, Інституту фізики плазми Макса Планка (Німеччина) та Інституту ядерних досліджень НАН України № Р-034d “Високоенергетичні іони в тороїдальних термоядерних пристроях”, спільного проекту УНТЦ та НАН України № 6392 “Збільшення потужності термоядерного реактора нерівноважними процесами у плазмі” (2017-2018 pp.), проекту “Явища, пов’язані з енергійними йонами, у токамаках та стелараторах” Цільової комплексної програми “Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій” НАН України (2017-2019 pp.) та проекту з альфвенових мод в стелараторах в рамках пакету робіт S2 (Stellarator Optimization: Theory, Development, Modelling and Engineering) консорціуму EUROfusion (2017-2018 pp.).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є з’ясування особливостей транспорту надтеплових іонів у стелараторах, зокрема в оптимізованих (квазіізодинамічних) стелараторах типу Wendelstein, отримання умов збудження та згасання альфвенових нестійкостей у плазмі таких стелараторів, а також дослідження пов’язаного з цими нестійкостями перенесення енергії поперек магнітного поля. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

- розвинути поліпшену теорію стохастичної дифузії надтеплових іонів;
- дослідити, яким чином радіальне електричне поле впливає на утримання надтеплових іонів;
- вивчити особливості згасання та збудження альфвенових власних мод механізмом Ландау у стелараторах;
- знайти умови дестабілізації альфвенових нестійкостей просторовою неоднорідністю основної плазми;
- розробити числові коди та виконати розрахунки потоків енергії поперек магнітного поля у дестабілізованих власних модах.

Об’єкт дослідження – плазма з надтепловими йонами в оптимізованих стелараторах.

Предмет дослідження – стохастична дифузія надтеплових іонів та альфвенові власні моди.

Методи дослідження. У дисертації застосовуються відомі аналітичні та числові методи: лагранжевий та гамільтоновий формалізми класичної механіки для аналізу руху заряджених частинок у неосесиметричних магнітних полях; результати теорії спеціальних функцій для знаходження адіабатичних інваріантів іонів; фур'є-аналіз для дослідження альфвенових власних коливань; методи Рунге-Кутта четвертого-п'ятого порядку точності для числового інтегрування баунс-усереднених орбіт іонів, для обчислення інкрементів/декрементів альфвенових власних мод та потоків енергії, що переносяться модами поперек магнітного поля.

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.

Праці, на основі яких написана дисертація, включають як теоретичні дослідження, так і застосування розвиненої теорії до конкретних термоядерних систем – стеларатора Wendelstein 7-X, реактора-стеларатора Helias та гвинтового пристрою LHD (Японія). Нижче подано перелік результатів, що мають практичне значення.

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 відсємного радіального електричного поля для поліпшення утримання локально захоплених надтеплових іонів.

Результати, отримані в дисертації, можуть бути використані в дослідженнях, що проводяться у ННЦ “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України, Інституті ядерних досліджень НАН України, Інституті теоретичної фізики імені М. М. Боголюбова НАН України, Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна. Вони також можуть бути використаними у Інституті фізики плазми Макса Планка (Німеччина) та Національному інституті термоядерних досліджень (Японія).

Публікації. Результати, що викладені в дисертації, опубліковано в 14 наукових роботах, з них 5 статей у закордонних фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science [2–6], 2 статті у фаховому виданні України, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus [1, 7], та 7 тез доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях, конгресах та нарадах. Наведені публікації повно відображають зміст дисертації.

Особистий внесок здобувача. Частину робіт, покладених в основу дисертації, виконано в співавторстві. Конкретний особистий внесок здобувача є таким. Робота [7] виконана здобувачем одноосібно. У роботі [1] здобувачем виконано всі викладки і виведення адіабатичних інваріантів пролітних і захоплених частинок, а також написана частина тексту. У роботі [2] здобувачеві належать виведення усереднених рівнянь руху частинок, числові розрахунки ліній рівня поздовжнього адіабатичного інваріанту та впливу електричного поля на орбіти локально захоплених частинок. У роботі [3] здобувачеві належить ідея та оцінки поліпшення утримання перехідних частинок за рахунок замкнення сепаратрис всередині

плазми. У роботах [4–6] здобувачеві належить створення числових кодів та виконання всіх числових розрахунків інкрементів/декрементів та потоків енергії поперек магнітного поля, а також участь у виведенні рівнянь та написанні тексту.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідалися на 15-ій Міжнародній стелараторній конференції (Мадрид, Іспанія, 2005), 32-ій Конференції ЄФТ з фізики плазми (Тарагона, Іспанія, 2005), 13-му Міжнародному конгресі з фізики плазми (Київ, 2006), 10-ій (Кластер Зеон, Німеччина, 2007), 11-ій (Київ, 2009) та 15-ій (Принстон, США, 2017) Технічних конференціях МАГАТЕ з енергійних частинок у системах магнітного утримання, Міжнародній конференції та школі з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (Харків, 2018), а також на щорічних наукових конференціях ІЯД у 2006, 2007, 2017 та 2018 рр.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку літератури. Загальний обсяг дисертації складає 159 сторінок. З них основний текст – 133 сторінки, на яких 17 рисунків та 2 таблиці. Список використаних літературних джерел налічує 92 найменування на 9 сторінках.

Подяки. Автор щиро вдячний науковому керівникові – професору, доктору фізико-математичних наук Я. І. Колесниченку – за всебічну підтримку та повсякчасну увагу до роботи. Автор також щиро дякує співавторам, з якими було виконано частину робіт, що увійшли до дисертації, особливо докторам фізико-математичних наук В. В. Луценку та Ю. В. Яковенку, та співробітникам відділу теорії ядерного синтезу Інституту ядерних досліджень (Київ) за корисні дискусії.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовується актуальність виконаних у дисертаційній роботі досліджень, обговорюється наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, вказується особистий внесок здобувача в наукові праці і відомості про апробацію результатів.

У першому розділі розглядається транспорт надтеплових іонів у стелараторах. В першому підрозділі цього розділу вводиться лагранжевий формалізм для опису дрейфового руху заряджених частинок у магнітному полі. Складна геометрія магнітного поля, характерна для стелараторів,

ускладнює відшукування канонічних змінних і застосування стандартного гамільтонового формалізму. Тому застосовано комбінований лагранжево-гамільтоновий формалізм [Littlejohn, J. Math. Phys. **23** (1982) 742] який дозволяє здійснювати перетворення в неканонічних змінних за допомогою груп перетворень Лі. Цей формалізм застосовується для відшукування інтегралів руху пролітних та локально захоплених частинок, які є адіабатичними інваріантами. За основу береться гіроусереднений лагранжіан з роботи [Littlejohn, J. Plasma Phys. **29** (1983) 111], записаний в бузерових магнітних координатах. Індукція магнітного поля $B = |\mathbf{B}|$ штучно розділяється на основну компоненту, яка має високу симетрію в бузерових координатах, та решту компонент, які розглядаються як збурення. Адіабатичні інваріанти руху в повному полі знаходяться як поправки до адіабатичних інваріантів у “незбуреному” полі. Це наближення має достатню точність у оптимізованих стелараторах типу Wendelstein, де шир і ψ -компоненти магнітного поля дуже малі. Для пролітних частинок за незбурене магнітне поле виявляється достатнім взяти середнє магнітне поле на осі, бо інші компоненти не обмежують руху частинки. При цьому незбурені змінні дія-кут можна виписати прямо із незбуреного лагранжіану. Перетворення змінних, що приводить збурений лагранжіан до вихідного вигляду, дає одночасно збурені орбіти частинок і поправки до інтегралів руху. Рух частинок, захоплених в локальну магнітну яму, пов’язану з (m_0, n_0) -компонентою магнітного поля, описується за допомогою незбуреного лагранжіану, де в незбурене магнітне поле включене середнє поле на осі та (m_0, n_0) -компонента, силою якої визначаються точки повороту частинки. Розкладаючи векторний потенціал магнітного поля за відхиленням частинки від магнітної поверхні і інтегруючи за кутовою змінною, отримуються вирази для змінних дія-кут через повні еліптичні інтеграли та еліптичні функції. Адіабатичні інваріанти руху в повному полі знаходяться аналогічно випадку пролітних частинок, причому для сильно захоплених частинок адіабатичний інваріант можна представити у досить простому вигляді.

У другому підрозділі той самий формалізм застосовано для опису беззіткнєннєвої стохастичної дифузії перехідних надтеплових іонів, пов’язаної із перетвореннями таких іонів із локально пролітних на локально захоплені і навпаки. Такі іони складають значну частину популяції захоплених іонів у стелараторах типу Wendelstein. Стохастична дифузія може виникати через незкорельовані стрибки поздовжнього адіабатичного інваріанту

частинки при переході через сепаратису між областями фазового простору, що відповідають локально пролітним та локально захопленим станам частинок. Для наближеного обчислення коефіцієнтів дифузії достатньо розглянути незбурений в сенсі попереднього підрозділу лагранжіан, який штучним перетворенням зводиться до лагранжіану залежної від часу одновимірної системи, близької до нелінійного маятника. Для розрахунку величин стрибків адиабатичних інваріантів, метод роботи [Neishtadt, Sov. J. Plasma Phys. **12** (1986) 568] пристосовано до структури фазового простору задачі. Обчислені за допомогою цих величин стрибків коефіцієнти стохастичної дифузії виявляються в кілька разів більшими, ніж попередні оцінки, що спирались на спрощені методи обчислення 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 першому підрозділі 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 гармоніка. Для випадку, коли радіального електричного поля немає, ці умови стосуються магнітної конфігурації, а в разі наявності радіального електричного поля із цих умов випливає існування резонансного значення частоти пов'язаного з електричним полем жорсткого обертання плазми, яке приводить до розімкнення дрейфових орбіт і швидкої втрати частинок. Оскільки вплив електричного поля на дрейф частинок залежить від енергії, заданому радіальному електричному полю відповідає певне резонансне значення енергії частинок, за якого вони не утримуються. Цей резонанс є досить широким, тому описаний ефект “грубий” і існує навіть тоді, коли використані наближення не є точними, що узгоджується з результатами числового моделювання орбіт частинок кодом ORBIS. Додатне електричне поле, яке задовільняє резонансній умові для α -частинок із енергіями $T \ll \mathcal{E} \ll 3.5 \text{ MeV}$, може бути корисним для видалення частково термалізованих α -частинок (“попелу”) із плазми реактора Helias.

Також показано, що присутність від'ємного електричного поля сприяє утриманню локально захоплених іонів, якщо їх енергія не перевищує певної величини, додатне електричне поле погіршує їх утримання, крім випадку дуже великих значень напруженості поля відносно енергії частинок, а електричне поле, локалізоване у кільці (тобто у певному інтервалі за

радіусом) може грати роль транспортного бар'єра для надтеплових іонів.

У другому підрозділі описано метод зменшення дифузійних втрат іонів за рахунок замкнення сепаратрис між локально пролітними та локально захопленими частинками всередині об'єму плазми. Оптимізовані стеларатори мінімізують швидкі втрати надтеплових іонів завдяки спеціальному підбору такої конфігурації магнітного поля, в якій велика частина ліній рівня поздовжнього адіабатичного інваріанта, що визначають дрейфові траєкторії частинок, замкнені всередині об'єму плазми. Проте через стохастичну дифузію поздовжнього адіабатичного інваріанту, що розглядається у першому розділі, точка перетворення здійснює випадкове блукання вздовж сепаратрис. Зрештою частинки потрапляють на незамкнені зовнішні дрейфові траєкторії і втрачаються за час порядку дифузійного часу. Однак, якщо додатково модифікувати плазмову конфігурацію таким чином, щоб не лише лінії рівня поздовжнього адіабатичного інваріанту, а й сепаратриса, були замкнені всередині плазми, цих втрат 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. Показано, що стелараторах типу Wendelstein діамagnetизм плазми та від'ємне радіальне електричне поле сприяють замкненню сепаратрис, а збільшення амплітуд Фур'є-компонент сили магнітного поля - їх розімкненню. Зокрема, у стандартній плазмовій конфігурації Wendelstein-7X із високим β зменшення найбільшої в цій конфігурації дзеркальної гармоніки магнітного поля в 1.5 рази дозволяє уникнути втрат надтеплових частинок із центральної області плазми $r/a < 0.5$. Локалізовані електричні поля покращують форму сепаратрис, коли зона від'ємного поля лежить ближче до центру плазми. У згаданий вище плазмовій конфігурації потенціальний бар'єр висотою 3 кВ замикає всередині плазми всі сепаратриса 50-кеВ-них частинок, які перетинають поверхню $r/a = 0.5$. 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.

Третій розділ присвячений проявам альфвенових резонансів, притаманних стелараторам. У першому підрозділі виведено загальні формули для інкрементів/декрементів, пов'язаних із механізмом Ландау, які допов-

нують відомі результати урахуванням кінетичних ефектів основної плазми та її стисливості. Показано, що згасання Ландау альфвенових мод відіграє важливу роль у стелараторах. При низькому β , згасання Ландау сильно стабілізує альвенові власні моди, пов'язані з тороїдальністю (ТАЕ) та ізомонні моди. При високому β , яке передбачається у реакторі Helias, згасання Ландау на іонах велике не лише для ТАЕ, а й для гвинтових (НАЕ) та дзеркальних (МАЕ) мод. Це сильне згасання є наслідком відсутності в стелараторах осової симетрії, що приводить до існування резонансів через гвинтові гармоніки магнітного поля ($\epsilon_h \equiv \epsilon_{\mu\nu}$ з $\mu \neq 0, \nu \neq 0$). Виняток становить згасання ТАЕ-мод у плазмі з високим β , яке відбувається за рахунок токамачного сайдбэнд-резонансу.

Сильний вплив неосесиметричних резонансів на ТАЕ та ізомонні моди у плазмах з низьким β можна пояснити наступним чином. Декремент згасання пропорційний до квадрата гвинтових фур'є-гармонік магнітного поля, які належать до найбільших гармонік у стелараторах (у Wendelstein 7-X найбільшою гвинтовою гармонікою є ϵ_{11}). На противагу, інкремент драйву пропорційний до квадрата тороїдальної гармоніки, $\gamma_\alpha \propto \epsilon_t^2 \ll \epsilon_h^2$. Крім цього, гвинтові резонанси дають ТАЕ та ізомонним модам взаємодіяти з дуже чисельною групою частинок, а саме з тепловими іонами основної плазми, якщо їх тиск β_i задовільняє певні умови.

Проведено детальний 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 інкремент драйву, викликаного пролітними інжекткованими іонами, тобто механізм згасання Ландау на основній плазмі може запобігти дестабілізації цих мод. Показано також, що розвинена теорія узгоджується з експериментом на LHD, де спостерігалися дві ТАЕ-моди: у цьому експерименті плазмове β було низьким, а β пучка – високим, і в області локалізації ТАЕ-мод існував великий градієнт тиску інжекткованих частинок. Завдяки цьому згасання було недостатнім, щоб стабілізувати нестійкість цих мод.

У другому підрозділі 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 власні моди в тороїдальних системах може перебороти їх згасання через механізм Ландау. Отримана необхідна умова дестабілізації ($Q_r(r) > |Q_v|(r)$). Відношення $Q_r/|Q_v|$ зростає з ростом відношення ре-

зонансної швидкості до теплової $u \equiv |v_{\parallel}^{res}|/v_T$ (при $u > 1$), але через експоненційне спадання інкременту збудження з ростом u оптимальними для дестабілізації є проміжні значення $u = 2 - 3$. В стелараторах відповідні резонансні швидкості можуть існувати за рахунок неосесиметричних резонансів.

Описаний механізм може приводити до збудження ЕАЕ чи іншої альфвенової моди з частотою $\omega \sim 200$ кГц на Wendelstein 7-X через резонанс на гвинтовій фур'є-гармонії рівноважного магнітного поля з $\mu = \nu = 1$. Показано, що збудження такої моди супроводжуватиметься доцентровим просторовим каналюванням енергії іонів, і що воно може пояснити довготривалі високочастотні осциляції, що спостерігалися в експерименті [Windisch, Krämer-Flecken, Velasco, Könies, Nührenberg, Grulke, Klinger and the W7-X team, Plasma Phys. Control. Fusion **59** (2017) 105002].

У третьому підрозділі вивчається перенесення енергії збудженими альфвеновими власними модами поперек магнітного поля. 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.

Потік енергії може бути спрямований і назовні, і досередини. Коли нестійка область розташована посередині області локалізації моди, утворюються обидва потоки, відповідно при більших і при менших радіусах. Особливий інтерес викликають випадки, коли нестійка область розташована на периферії, а згасання домінує у центральній області плазми. При цьому відбувається доцентрове просторове каналювання, і нестійкість нагріває плазму в центральній області, охолоджуючи периферію. Проте навіть у таких випадках одночасно з доцентровим каналюванням може генеруватися і великий потік енергії назовні. Для цього потрібно, щоб інкремент нестійкості був великим. Це показано на прикладі збуджуваної ∇T_i нестійкості ЕАЕ-моди у Wendelstein 7-X, розглянутої у попередньому підрозділі. Штучно варіюючи температуру іонів у центрі плазми W7-X від $T(0) \sim 2$ кеВ (що відповідає першій експериментальній кампанії) до $T(0) = 5 - 10$ кеВ, було показано, що густина потоку енергії при незмінній амплітуді моди зростає майже на два порядки: потік енергії через поверхню максимального локального інкременту збудження зростає від $\mathcal{P} \lesssim 0.05$ МВт

до $\mathcal{P} \sim 1$ МВт. Оцінки на основі даних по базовому сценарію ITER зі струмом плазми 15 МА показують, що при очікуваній ТАЕ-нестійкості з інкрементом $\gamma/\omega \sim 10^{-2}$, локалізованій поблизу $r/a \gtrsim 0.5$, там може виникати потік такого ж порядку величини $\mathcal{P} \sim 1$ МВт.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі з'ясовано особливості транспорту надтеплових іонів у стелараторах, зокрема в оптимізованих (квазіізодинамічних) стелараторах типу Wendelstein, отримано умови збудження та згасання альфвенових нестійкостей у плазмі таких стелараторів, та вивчено перенесення енергії поперек магнітного поля, пов'язане з цими нестійкостями. Основні результати, отримані в дисертації:

1. Розвинено теорію стохастичної дифузії надтеплових іонів та запропоновано метод послаблення її негативного впливу в оптимізованих стелараторах. Показано, що стохастична дифузія перехідних частинок у стелараторах типу Wendelstein є у кілька разів сильнішою, ніж передбачалося раніше [Beidler, Kolesnichenko, Marchenko, Sidorenko, Wobig, Phys. Plasmas **8** (2001) 2731], завдяки створюваній магнітним полем асиметрії між локально пролітними частинками із протилежними знаками поздовжньої швидкості. Ефект підсилення дифузії за рахунок асиметрії особливо помітний для слабо перехідних частинок.

Отримано нові вирази для адіабатичних інваріантів руху ведучого центру частинок у аксіально-несиметричному полі, які дають змогу визначити рух частинок у компактних (з малим числом періодів N) пристроях зі складною конфігурацією магнітного поля зі значно більшою точністю.

Запропоновано метод послаблення негативного впливу стохастичної дифузії на утримання надтеплових іонів шляхом замикання сепаратрис між локально пролітними та локально захопленими орбітами всередині плазми: якщо для частинки з певним пітч-кутом дрейфові орбіти та сепаратриса замкнені всередині плазми, така частинка не втрачатиметься з плазми за час порядку часу стохастичної дифузії. Показано, що для стелараторів типу Wendelstein діамагнетизм плазми допомагає замкнути сепаратриси, тороїдальна гармоніка магнітного поля шкодить цьому, а ролі дзеркальної та гвинтової гармонік залежать від їх співвідношення між собою. Зокрема показано, що у випадку, коли гвинтова гармоніка перевищує дзеркальну на границі плазми, зменшення дзеркальної гармоніки, якою на

W7-X відносно легко керувати за допомогою кругових обмоток, може запобігти втраті надтеплових іонів через стохастичну дифузію із центральної області плазми майже до половини її радіуса.

Також показано, що на зменшення втрат можуть вплинути зміни радіального електричного поля (які можуть утворюватися, наприклад, від переходу між електронним та іонним коренями чи під час формування внутрішніх транспортних бар'єрів). Зокрема показано, що від'ємне радіальне електричне поле допомагає замкнути сепаратиси і що локалізовані потенціальні бар'єри поліпшують форму сепаратрис, коли область від'ємного поля лежить всередині області додатнього поля.

Запропоновано використовувати замкнення сепаратрис всередині плазми у якості додаткового швидкого критерію оптимізації стелараторних конфігурацій.

2. Показано важливість впливу електричного поля на утримання локально захоплених надтеплових іонів у стелараторах. Радіальне електричне поле є невід'ємною властивістю плазми у аксіально-несиметричних тороїдальних системах, бо воно забезпечує амбіполярність неокласичної дифузії у цих системах. У дисертації знайдено, що присутність від'ємного електричного поля сприяє утриманню локально захоплених іонів. Іони утримуються електричним полем, якщо їх енергія не перевищує певної величини. Електричне поле, локалізоване у кільці (тобто у певному інтервалі за радіусом) може грати роль транспортного бар'єра для надтеплових іонів. Результати, отримані за допомогою аналізу усереднених рівнянь для Wendelstein 7-X та реактора Helias, узгоджуються з результатами числового моделювання за допомогою коду ORBIS [2].

Також знайдено, що додатнє електричне поле погіршує утримання локально захоплених іонів, крім випадку дуже великих значень напруженості поля відносно енергії частинок. Шкідливий вплив додатнього електричного поля особливо сильний, коли частота викликаного ним жорсткого обертання плазми близька до певних резонансних значень.

Запропоновано використання додатнього радіального електричного поля із відповідно підібраним профілем для видалення гелієвого попелу у реакторі Helias.

3. Вперше показано можливість збудження альфвенових власних мод градієнтом температури іонів в неосесиметричних системах. 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. Якщо при цьому інші механізми згасання слабкі, збуджуватиметься альфвенова нестійкість. Отримано необхідну умову дестабілізації моди та показано, що дестабілізуючий вплив зростає з ростом відношення резонансної швидкості до теплової, коли це відношення більше одиниці.

Показано, що за певних умов збуджувані ∇T нестійкості можуть приводити до доцентрового просторового каналювання енергії – енергія, поглинута модою у нестійкій області, нагріває плазму в стійкій області, розташованій при менших радіусах. Температурно-градієнтна нестійкість може впливати на робочі показники плазми у Wendelstein 7-X, а також може грати роль в інших стелараторах, зокрема у LHD, TJ-II, H-1, U-3M.

Зокрема показано, що описаний механізм може приводити до збудження альфвенової моди з частотою $\omega \sim 200$ кГц на Wendelstein 7-X через резонанс на гвинтовій фур'є-гармонії рівноважного магнітного поля з $\mu = \nu = 1$, яке супроводжуватиметься доцентровим просторовим каналюванням енергії іонів. Збудження такої моди може пояснити тривалі високочастотні осциляції, що спостерігалися в експерименті [Windisch, Krämer-Flecken, Velasco, Könies, Nührenberg, Grulke, Klinger and the W7-X team, Plasma Phys. Control. Fusion **59** (2017) 105002].

4. Виявлено властивості перенесення енергії поперек магнітного поля власними альфвеновими модами. Показано, що дестабілізація власних мод у плазмі обмеженого об'єму супроводжується генерацією радіального потоку енергії, який може бути спрямований не лише від центру до периферії, але і з периферії до центру плазми. Поперечний потік виникає внаслідок порушення балансу між доцентровим та відцентровим потоками енергії, пов'язаними із біжучими хвилями, з яких складається мода. Потік енергії можна розділити на дві частини, одна з яких постачає енергію, що переходить у зростання амплітуди моди в областях, де мода збуджується слабо або взагалі не збуджується, а інша нагріває плазму в областях, де домінує згасання, і відповідає за просторове каналювання.

Знайдено, що густина потоку енергії сильно залежить від температури іонів: наприклад, для ЕАЕ-моди у Wendelstein 7-X при незмінній амплітуді моди збільшення температури іонів у центрі плазми з 2 до 10 кеВ викликає збільшення потоку енергії через поверхню максимального інкременту нестійкості майже на два порядки.

5. Виявлено сильний стабілізуючий вплив механізму згасання Лан-

дау на альфвенів моді у стелараторах. Показано, що згасання Ландау альфвенів мод відіграє важливу роль у стелараторах завдяки існуванню неосесиметричних резонансів. При низькому β , згасання Ландау сильно стабілізує ТАЕ та ізомонні моди у стелараторі Wendelstein 7-X. При високому β , яке передбачається у реакторі Helias, згасання Ландау на іонах велике не лише для ТАЕ, а й для НАЕ та МАЕ мод. Це сильне згасання є наслідком відсутності в стелараторах осової симетрії, що приводить до існування резонансів через гвинтові гармоніки магнітного поля. Виняток становить згасання ТАЕ-мод у плазмі з високим β , яке відбувається за рахунок токамачного сайдбэнд-резонансу. Згасання високочастотних щілинних мод у плазмах з низьким β відбувається через токамачний сайдбэнд-резонанс, але роль цього згасання незначна, тому за відсутності більш сильних механізмів згасання, високочастотні щілинні моди легше дестабілізуються у плазмах з низьким β . Декремент згасання ізомонних мод може перевищувати інкремент драйву, викликаного пролітними інжектованими іонами, тобто механізм згасання Ландау на основній плазмі може запобігти дестабілізації цих мод.

Розвинена теорія узгоджується з експериментом на основному японському гвинтовому пристрої LHD, де спостерігалися дві ТАЕ-моди: у цьому експерименті плазмове β було низьким, а β пучка – високим, і в області локалізації ТАЕ-мод існував великий градієнт тиску інжектованих частинок. Завдяки цьому згасання було недостатнім, щоб стабілізувати нестійкість цих мод.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Tykhyy A. V., Yakovenko Yu. V. Invariants of fast ion motion in stellarators // Ukrainian Journal of Physics. 2006. Vol. 51, no. 11-12. P. 1077–1082. *(Особистий внесок здобувача: здобувачем виконано всі викладки і виведення адіабатичних інваріантів пролітних і захоплених частинок, а також написана частина тексту.) (Видання входить до SCOPUS)*
2. Kolesnichenko Ya. I., Lutsenko V. V., Tykhyy A. V., Weller A., Werner A., Wobig H., Geiger J. Effects of the radial electric field on the confinement of trapped fast ions in the Wendelstein 7-X and Helias reactor // Physics of Plasmas. 2006. Vol. 13, no. 7. P. 072504. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належать виведення усереднених*

- рівнянь руху частинок, числові розрахунки ліній рівня поздовжнього адіабатичного інваріанту та впливу електричного поля на орбіти локально захоплених частинок.) (Видання входить до SCOPUS та Web of Science)*
3. Yakovenko Yu. V., **Tykhyy A. V.**, Werner A. Mitigation of stochastic diffusion losses in optimized stellarators // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2007. Vol. 49, no. 6. P. 703–711. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить ідея та оцінки поліпшення утримання перехідних частинок за рахунок замкнення сепаратриси всередині плазми.) (Видання входить до SCOPUS та Web of Science)*
 4. Kolesnichenko Ya. I., **Tykhyy A. V.** Landau damping of Alfvénic modes in stellarators // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. Vol. 60. P. 125004. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить створення числових кодів та виконання всіх числових розрахунків інкрементів/декрементів, а також участь у виведенні рівнянь та написанні тексту.) (Видання входить до SCOPUS та Web of Science)*
 5. Kolesnichenko Ya. I., **Tykhyy A. V.** Temperature gradient driven Alfvén instability producing inward energy flux in stellarators // Physics Letters A. 2018. Vol. 382, no. 37. P. 2689–2692. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить створення числових кодів та виконання всіх числових розрахунків інкрементів/декрементів та потоків енергії у дестабілізованих власних модах, а також участь у виведенні рівнянь та написанні тексту.) (Видання входить до SCOPUS та Web of Science)*
 6. Kolesnichenko Ya. I., **Tykhyy A. V.** Radial energy flux during destabilized Alfvén eigenmodes // Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25. P. 102507. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить створення числових кодів та виконання всіх числових розрахунків потоків енергії, що утворюються у дестабілізованих власних модах, а також участь у виведенні рівнянь та написанні тексту.) (Видання входить до SCOPUS та Web of Science)*
 7. **Тихий А. В.** Стохастична дифузія енергійних йонів у стелараторах типу Wendelstein // Ukrainian Journal of Physics. 2018. Т. 63, № 6. С. 495–505. *(Робота виконана здобувачем одноосібно.) (Видання входить до SCOPUS)*

8. Kolesnichenko Ya. I., Lutsenko V. V., Weller A., Werner A., Wobig H., Yakovenko Yu.V., Geiger J., **Tykhyy A. V.**, Zegenhagen S. Novel physics involved in interpretation of Alfvénic activity accompanied by thermal crashes in W7-AS // 15th International Stellarator Workshop : abstr. intl. conf., 3-7 October 2005. Madrid, Spain, 2005. P. 15. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить написання числового коду та моделювання енерговмісту плазми при теплових обвалах.)*
9. Kolesnichenko Ya. I., Lutsenko V. V., Weller A., Werner A., Yakovenko Yu.V., Geiger J., **Tykhyy A. V.**, Zegenhagen S. Analysis and interpretation of observations of Alfvénic activity in Wendelstein 7-AS // 32nd EPS Plasma Physics Conference combined with the 8th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets : abstr. intl. conf., 27 June - 1 July 2005. Tarragona, Spain, 2005. Europhysics Conference Abstracts Vol. 29C, P-2.125. Published in CD form. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить написання числового коду та моделювання енерговмісту плазми при теплових обвалах.)*
10. Kolesnichenko Ya. I., Lutsenko V. V., **Tykhyy A. V.**, Weller A., Werner A., Wobig H., Geiger J. Confinement of fast ions in the presence of the radial electric field in Wendelstein-line stellarators // 13th International Congress on Plasma Physics : abstr. intl. conf., 22-26 May 2006. Kyiv, 2006. P. 114. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належать виведення усереднених рівнянь руху частинок, числові розрахунки ліній рівня поздовжнього адіабатичного інваріанту та впливу електричного поля на орбіти локально захоплених частинок.)*
11. Yakovenko Yu. V., **Tykhyy A. V.**, Werner A. Mitigation of stochastic diffusion losses in optimized stellarators // 13th International Congress on Plasma Physics : abstr. intl. conf., 22-26 May 2006. Kyiv, 2006. P. 132. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить ідея та оцінки поліпшення утримання перехідних частинок за рахунок замкнення сепаратриси всередині плазми.)*
12. Lutsenko V. V., Kolesnichenko Ya. I., Weller A., Werner A., Wobig H., **Tykhyy A. V.** Effect of the radial electric field on the confinement of fast ions in optimized stellarators // 10th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems : abstr. intl. conf., 8-10 October 2007. Kloster Seeon, Germany, 2007. Poster P-17. Published in CD form. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належать виведення усереднених рівнянь руху частинок, числові розрахунки ліній рівня*

- поздовжнього адіабатичного інваріанту та впливу електричного поля на орбіти локально захоплених частинок.)*
13. **Tykhyy A. V.** Stochastic diffusion of energetic ions in Wendestein-type configurations // 11th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems : abstr. intl. conf., 21-23 September 2009. Kyiv, 2009. Poster P-40. Published in CD form. *(Робота виконана здобувачем одноосібно.)*
 14. **Tykhyy A. V.** Stochastic diffusion of energetic ions in Wendelstein-type stellarators // 15th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems : abstr. intl. conf., 5-8 September 2017. Princeton, USA, 2017. P. 88. *(Робота виконана здобувачем одноосібно.)*
 15. Kolesnichenko Ya. I., **Tykhyy A. V.** Generation of inward energy flux by Alfvén eigenmodes // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion : abstr. XI Intl. Conf., 10-13 September 2018. Kharkiv, 2018. P. 21. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить створення числових кодів та виконання всіх числових розрахунків інкрементів/декрементів та потоків енергії, що утворюються у дестабілізованих власних модах.)*

АНОТАЦІЯ

Тихий А. В. Хвильові процеси та транспорт надтеплових іонів у квазіізодинамічних стелараторах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми. – Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України; Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, м. Харків, 2019.

У дисертаційній роботі з'ясовано особливості транспорту надтеплових іонів у стелараторах, зокрема в оптимізованих (квазіізодинамічних) стелараторах типу Wendelstein, отримано умови збудження та згасання альфвенових нестійкостей у плазмі таких стелараторів, та вивчено перенесення енергії поперек магнітного поля, пов'язане з цими нестійкостями.

Розвинено теорію стохастичної дифузії надтеплових іонів та показано, що стохастична дифузія перехідних іонів у стелараторах типу Wendelstein є у кілька разів сильнішою, ніж передбачалося раніше. Запропоновано

метод послаблення негативного впливу стохастичної дифузії на утримання надтеплових іонів шляхом замикання сепаратрис між локально пролітними та локально захопленими орбітами всередині плазми, та вивчено вплив радіального електричного поля на утримання локально захоплених надтеплових іонів у стелараторах. Запропоновано використання резонансного електричного поля для видалення гелієвого “попелу” з реактора-стеларатора Helias.

Виявлено сильний стабілізуючий вплив механізму згасання Ландау на альфвенові моди у стелараторах завдяки існуванню неосесиметричних резонансів та показано, що збудження ізомонних і тороїдальних альфвенових власних мод у першій експериментальній кампанії з інжекцією нейтральних пучків на Wendelstein 7-X є малоімовірним. Вперше показано можливість збудження альфвенових власних мод градієнтом температури іонів основної плазми в неосесиметричних системах, що супроводжується перенесенням модами енергії поперек магнітного поля. Описаний механізм може приводити до збудження альфвенової моди з частотою $\omega \sim 200$ кГц на Wendelstein 7-X, що може пояснити довготривалі високочастотні осциляції, що спостерігалися в експерименті.

Ключові слова: стеларатор, надтеплові іони, стохастична дифузія, альфвенові власні моди, нестійкості плазми.

ABSTRACT

Tykhyy A.V. Wave processes and transport of suprathermal ions in quasi-isodynamic stellarators. – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of candidate of science in physics and mathematics by speciality 01.04.08, Plasma Physics. – Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine; V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

It is demonstrated for the first time that Alfvén eigenmodes can be destabilized by ion temperature gradient in non-axisymmetrical systems. From the developed theory it follows that the destabilizing influence of spatial inhomogeneity of bulk plasma with a Maxwellian velocity distribution on Alfvén eigenmodes in toroidal systems can overcome their damping via the Landau mechanism. A necessary condition of mode destabilization is derived. It is shown that the destabilizing influence grows with the increase of the resonance velocity relative to the thermal velocity, when their ratio is greater than unity,

but because of the exponential decrease of the increment of the drive with the growth of this ratio, intermediate values of $2 - 3$ are optimal for destabilization; in stellarators, resonance velocities required to provide this ratio can exist due to non-axisymmetric resonances. It is shown that this mechanism may lead to the destabilization of an Alfvén eigenmode with frequency $\omega \sim 200$ kHz in Wendelstein 7-X through a resonance with the helical harmonic of the equilibrium magnetic field with mode numbers $\mu = \nu = 1$, accompanied by inward spatial channeling of ion energy. The destabilization of such a mode may explain long-lasting high-frequency oscillations which have been observed experimentally.

The properties of energy transfer across the magnetic field by Alfvén eigenmodes are elucidated. Expressions for the energy flux are derived from the energy balance equation under the condition that the radial structure of the mode does not change under the instability. It is shown that destabilization of eigenmodes in a limited plasma is accompanied by the generation of a radial energy flux, which can be directed not only towards plasma periphery, but also from the periphery to the center of the plasma. The transverse flux appears due to a loss of balance between the inward and outward energy fluxes associated with the traveling waves that compose the mode. The energy flux may be split in two parts, one of which supplies the energy that is converted into growing mode amplitude and is more important in regions where the mode is weakly driven or not driven at all, and the other part which heats the plasma in regions where damping dominates. This second part is responsible for spatial channeling. It is found that energy flux density strongly depends on ion temperature: for instance, for an ellipticity-induced EAE mode in Wendelstein 7-X with a fixed amplitude, an increase of ion temperature in plasma center from 2 keV to 10 keV leads to an almost two order of magnitude increase of energy flux through the surface of maximum instability drive.

A theory of stochastic diffusion of suprathermal ions is developed and a method of mitigation of its harmful influence in optimized stellarators is proposed. It is shown that stochastic diffusion of transitioning particles in Wendelstein-type stellarators is several times stronger than previously predicted, due to the asymmetry between locally passing particles with opposite signs of parallel velocity created by the magnetic field. A method of mitigation of the harmful influence of stochastic diffusion on the confinement of suprathermal ions via the closure of separatrices between locally trapped and locally passing particles inside the plasma volume is proposed: if both the drift orbits for particles with

a certain pitch angle and the separatrix are closed inside the plasma, such particles will not be lost from the plasma on the stochastic diffusion timescale. It is shown that in Wendelstein-type stellarators plasma diamagnetism helps to close the separatrices. The closure of the separatrices inside the plasma is proposed as an additional fast criterion in stellarator configuration optimization.

The importance of radial electric fields for suprathermal ion confinement in stellarators is elucidated. From a qualitative analysis of the bounce-averaged equations of motion of locally trapped suprathermal ions, conditions of good confinement of these ions in stellarator configurations where the mirror harmonic of the magnetic field dominates are derived. When radial electric fields are absent, these conditions pertain to the magnetic configuration. In the presence of radial electric fields, from these conditions there follows the existence of a resonance value of the frequency of rigid plasma rotation associated with the electric field. Rotation at this frequency leads to the straightening of drift orbits and prompt losses of suprathermal ions. A method of using positive radial electric fields is proposed to remove helium ash in a Helias reactor. Appropriate plasma heating regimes may be selected to implement this suggestion. It is also shown that a negative radial electric field helps to close the separatrices of transitioning suprathermal ions, which reduces their losses from stochastic diffusion, and that localized potential barriers improve the shape of the separatrices if the negative field region lies closer to the center than the positive field region.

It is shown for the first time that the Landau damping mechanism exerts strong stabilizing influence on Alfvén modes in stellarators due to the absence of axial symmetry in helical devices. General expressions for increments/decrements are derived that extend known results by taking into account the compressibility of the plasma and the kinetic effects of bulk ions. When plasma pressure is low, Landau damping strongly stabilizes TAE modes and isomon modes in Wendelstein 7-X. At higher plasma pressures projected for the Helias reactor, Landau damping on bulk ions may dominate not only for TAE modes, but also for helicity- and mirror-induced Alfvén eigenmodes.

Keywords: stellarator, suprathermal ions, stochastic diffusion, Alfvén eigenmodes, plasma instabilities.

АННОТАЦИЯ

Тихий А. В. Волновые процессы и транспорт надтепловых ионов в

квазиизодинамических стеллараторах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. – Институт ядерных исследований Национальной академии наук Украины; Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина Министерства образования и науки Украины, г. Харьков, 2019.

В диссертационной работе выяснены особенности транспорта надтепловых ионов в стеллараторах, в частности в оптимизированных (квазиизодинамических) стеллараторах типа Wendelstein, получены условия возбуждения и затухания альфвеновских неустойчивостей в плазме таких стеллараторов и изучен связанный с этими неустойчивостями перенос энергии поперек магнитного поля.

Развита теория стохастической диффузии надтепловых ионов и показано, что стохастическая диффузия переходных ионов в стеллараторах типа Wendelstein в несколько раз сильнее, чем предполагалось ранее. Предложен метод ослабления вредного влияния стохастической диффузии на удержание надтепловых ионов путем замыкания сепаратрис между локально пролетными и локально запертыми орбитами внутри плазмы, и изучено влияние радиального электрического поля на удержание локально запертых надтепловых ионов в стеллараторах. Предложено использовать резонансное электрическое поле для удаления гелиевого “пепла” из реактора-стелларатора Helias.

Выявлено сильное стабилизирующее влияние механизма затухания Ландау на альфвеновские моды в стеллараторах, имеющее место благодаря существованию в них неосесимметричных резонансов, и показано, что возбуждение изомонных и тороидальных альфвеновских собственных мод в первой экспериментальной кампании с инжекцией нейтральных пучков на Wendelstein 7-X маловероятно. Впервые показана возможность возбуждения альфвеновских собственных мод градиентом температуры ионов основной плазмы в неосесимметричных системах, сопровождающегося переносом модами энергии поперек магнитного поля. Описанный механизм может приводить к возбуждению альфвеновской моды с частотой $\omega \sim 200$ кГц на Wendelstein 7-X, что может объяснить продолжительные высокочастотные осцилляции, наблюдавшиеся в эксперименте.

Ключевые слова: стелларатор, надтепловые ионы, стохастическая диффузия, альфвеновские собственные моды, неустойчивости плазмы.