

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

**ТИЩЕНКО МАРГАРИТА GERMANIBNA**

УДК 533.9

**ПОШИРЕННЯ АЛЬФВЕНОВИХ ХВИЛЬ ТА ПЕРЕНЕСЕННЯ ЕНЕРГІЇ  
ПОПЕРЕК МАГНІТНИХ ПОВЕРХОНЬ У ТОРОЇДАЛЬНІЙ ПЛАЗМІ**

01.04.08 – фізика плазми

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті ядерних досліджень Національної академії наук України.

**Науковий керівник:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Яковенко Юрій Володимирович**,  
Інститут ядерних досліджень НАН України (м. Київ),  
провідний науковий співробітник відділу теорії  
ядерного синтезу.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Черемних Олег Костянтинович**, Інститут космічних  
досліджень Національної академії наук України та  
Державного космічного агентства України (м. Київ),  
заступник директора з наукової роботи;  
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий  
співробітник **Древаль Микола Борисович**, Інститут  
фізики плазми Національного наукового центру  
«Харківський фізико-технічний інститут» НАН  
України, начальник лабораторії діагностики плазми.

Захист дисертації відбудеться “13” травня 2021 р. о 16-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61108, м. Харків, пр. Академіка Курчатова, 31, ауд. 313.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи 4.

Автореферат розісланий “12” квітня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої  
ради Д 64.051.12



Андрій ГАХ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Термоядерна енергія має всі шанси стати екологічно прийнятним і невичерпним джерелом енергії. Наразі дослідження термоядерної енергії успішно ведуться у багатьох країнах світу, зокрема, в Європейському союзі вони здійснюються в рамках програми Євратома, асоційованим членом якої нещодавно стала Україна. У Франції продовжується будівництво реактора-токамака ITER, в якому планується отримання самоіндукованої термоядерної реакції. Істотним елементом програми робіт на існуючих токамаках є підготовка до експериментів на ITER.

Одним з найважливіших показників термоядерного пристрою (токамака або стеларатора), без якого неможливо досягти його функціонування як реактора, є здатність добре утримувати частинки та енергію. Із просуванням експериментів з керованого ядерного синтезу до реакторних параметрів усе більшу роль в енергобалансі плазми відіграють швидкі (надтеплові, енергійні) йони, які з'являються при нагріванні плазми інжекцією пучків швидких нейтральних атомів (Neutral Beam Injection (NBI)) та радіочастотними хвилями (Ion Cyclotron Resonance Heating (ICRH)), а також є продуктами реакцій синтезу. Енергійні йони забезпечують нагрівання плазми в існуючих пристроях та будуть підтримувати термоядерне горіння у майбутніх реакторах. З цієї причини фізика швидких йонів у термоядерній плазмі привертає до себе все більшу увагу, їй присвячені численні огляди, а здатність добре утримувати такі йони є важливою характеристикою термоядерного пристрою.

Існує багато фізичних механізмів, які ведуть до погіршення утримання швидких йонів, тобто до їх перенесення з центральної частини плазми, або до втрат. У токамаках з достатньо сильним струмом “класичні” механізми - миттєві орбітальні втрати та неокласичне перенесення завдяки кулонівським зіткненням - не вважаються небезпечними, тому головна небезпека походить від порушень симетрії магнітного поля (у першу чергу, дискретності магнітних катушок) та від різноманітних збурень електромагнітного поля (магнітних островів, пилчастих коливань та інших нестійкостей плазми). У стелараторах класичні механізми можуть відігравати значну роль, але це не применшує роль транспорту, пов'язаного зі збуреннями плазми. Аналіз фізичних механізмів дії збурень на швидкі йони можна знайти, зокрема, в нещодавній оглядовій публікації [W. W. Heidbrink and R. B. White, *Physics of Plasmas* **27**, 030901 (2020)]; варто відзначити також так зване “цеберне перенесення” (bucket transport) [C. T. Hsu et al., *Phys. Rev. Lett.* **72**, 2503–2507 (1994)] - перенесення йонів, захоплених у резонансі зі збуренням плазми, при зміні розташування резонансу.

Важливим різновидом нестійкостей плазми, які здатні погіршувати утримання швидких йонів, є нестійкості, збуджені цими йонами (фішбон-моди, альфвенові моди, швидкі магнітозвукові моди тощо). Серед цих нестійкостей важливе місце займають альфвенові нестійкості, що виникають через резонансне збудження альфвенових хвиль швидкими йонами. Такі нестійкості було спостережено в усіх типах тороїдальних термоядерних пристроїв. Було знайдено, що ці нестійкості можуть викликати перерозподіл збуджуючих йонів або навіть виштовхувати їх з

плазми, що може в реакторі призвести до небезпечних навантажень на стінку установки.

З іншого боку, деякі нестійкості, спричинені енергійними йонами, не мають помітного впливу на утримання ані основної плазми, ані енергійних йонів. Проте і тоді вивчення таких нестійкостей становить інтерес, бо вони можуть використовуватись для діагностики плазми (діагностика плазми за допомогою альфвенових нестійкостей отримала назву “МГД-спектроскопі”).

Альфвенові хвилі в токамаках та стелараторах вивчаються також у зв’язку з їх використанням для нагрівання плазми. Альфвенівське нагрівання плазми, використовується зараз у деяких пристроях, зокрема, в Урагані-2М [E. Moiseenko et al., *Ukrainian Journal of Physics*, **62**, 311 (2018)].

Існують експериментальні свідчення того, що альфвенові нестійкості здатні впливати на час утримання енергії плазми, зменшуючи його A. Weller et al., *Physics of Plasmas* **8**, 931–956 (2001); D.Stutman et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 115002 (2009)], причому цей вплив не можна звести до перерозподілу або втрат швидких йонів. Зокрема, в експериментах на NSTX (США) [D.Stutman et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 115002 (2009)] збільшення потужності NBI-нагрівання плазми з 2 МВт до 6 МВт призводило до зменшення температури плазми в центральній області; автори пов’язують це з появою множинних мод, які вони ідентифікували як GAE-моди (Global Alfvén Eigenmodes - глобальні альфвенові власні моди), локалізовані в центральній частині плазми (пізніше було знайдено, що частина цих мод може бути швидкими магнітозвуковими модами). Одним з можливих пояснень такого впливу є аномальний транспорт тепла електронами. Іншим поясненням згаданих експериментів на NSTX є просторове каналювання енергії інжекттованих йонів - перенесення енергії з одної області плазми до іншої області збудженими власними модами. Воно може мати місце, коли просторові області випромінювання хвилі енергійними йонами та поглинання хвилі основною плазмою не збігаються.

Підсумовуючи сказане, можна зробити висновок, що для того, щоб добре утримувати в плазмі швидкі йони (а також енергію, яку вони постачають плазмі), потрібно мати розуміння фізичних механізмів їх перенесення та енергетичних потоків, які створюють нестійкості, збуджені цими йонами. Серед цих нестійкостей важливе місце займають альфвенові нестійкості, які виникають через резонансне збудження альфвенових хвиль швидкими йонами. Ці міркування обумовили вибір теми дисертації, у якій вивчаються процеси поширення альфвенових хвиль, перенесення енергії хвилями поперек магнітного поля та енергетичні потоки, що виникають при взаємодії швидких йонів зі збуреннями електромагнітного поля токамака.

**Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження, що ввійшли до дисертаційної роботи, виконувались в рамках тем Національної Академії наук України: № 0106U011414 “Колективні явища та транспортні процеси в плазмі тороїдальних систем” (2007-2011 pp.), №0112U003278 “Дослідження фізичних процесів у плазмі з надтепловими йонами у токамаках та стелараторах” (2012-2016 pp.), №0116U002923 “Багаточастинкові процеси в термоядерних системах” (2017-2021 pp.); Проектів цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України “Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого

термоядерного синтезу та плазмових технологій” № 0114U000678 “Коллективні процеси у плазмі з надтепловими йонами в тороїдальних термоядерних пристроях” (2014-2016 рр.), №0117U003322 “Явища, пов’язані з енергійними йонами, у токамаках та стелараторах” (2017 – 2019 рр.); Спільного проекту науково-технологічного центру в Україні та НАН України № 6058 “Вплив йонів високих енергій на характеристики плазми в міжнародному реакторі ITER та інших термоядерних пристроях” (2015-2017 рр.); Спільного проекту науково-технологічного центру в Україні та НАН України № 6392 “Збільшення потужності термоядерного реактора нерівноважними процесами в плазмі” (2018-2020 рр.); Пакету робіт JET1 (Analysis and Modelling Campaign) консорціуму EUROfusion (2017-2018 рр.).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є вивчення поширення альфвенових хвиль поперек магнітного поля, знаходження потоків енергії поперек магнітного поля, які виникають при взаємодії швидких йонів з магнітогідродинамічними хвилями та магнітними островами, та аналіз фізичних механізмів, що викликають такі потоки. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні наукові завдання:

- Проаналізувати зміни модової структури кінетичних альфвенових хвиль при їх поширенні поперек тороїдного магнітного поля;
- Знайти потоки швидких йонів та їх енергії, які виникають при їх гальмуванні за наявності магнітних островів;
- Оцінити максимально можливий енергетичний потік, що виникає при каналюванні енергії швидких йонів множинними альфвеновими нестійкостями;
- Проаналізувати вплив каналювання енергії термоядерних альфа-частинок швидкими магнітозвуковими модами на енергобаланс в експериментах із дейтерій-третієвою плазмою в токамаку JET (Велика Британія).

**Об’єкт дослідження** - плазма токамаків та стелараторів, що містить швидкі йони.

**Предмет дослідження** - альфвенові хвилі в плазмі токамаків та стелараторів і процеси перенесення швидких частинок та енергії.

**Методи дослідження.** У дисертації застосовуються відомі аналітичні та числові методи: лагранжів та гамільтонів формалізми класичної механіки, метод ВКБ та метод діаграм Стокса, метод Рунге-Кутти четвертого порядку, метод скінченних різниць, теорія нелінійних резонансів в гамільтонових системах.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Основними науковими результатами є такі:

1. Досліджено новий механізм трансформації модової структури кінетичних альфвенових хвиль при проходженні певних раціональних магнітних поверхонь у тороїдному магнітному полі; знайдено ефективність такої трансформації.
2. Вперше показано, що гальмування швидких йонів у токамаку за наявності порушень симетрії (магнітних островів) створює радіальні потоки частинок та енергії; знайдено величину та просторове розташування цих потоків.
3. Вперше пораховано максимальний енергетичний потік, що може передаватися поперек магнітного поля альфвеновими модами (GAE-модами та TAE-модами), коли збудження моди швидкими йонами та поглинання її енергії термічною плазмою є розділеними в просторі.

4. Вперше знайдено амплітуду множинних альфвенових мод, потрібну для того, щоб такі моди могли відібрати значну частку енергії швидких йонів, що є необхідною умовою просторового каналювання.

5. Вперше досліджено вплив просторового каналювання енергії термоядерних альфа-частинок швидкими магнітозвуковими модами на енергобаланс в експериментах із дейтерій-третієвою плазмою в токамаку JET; показано, що просторове каналювання може відігравати важливу роль у покращенні характеристик плазми та зростанні йонної температури в експериментах із нагріванням плазми альфа-частинками у токамаку JET.

**Практичне значення одержаних результатів.** Праці, на основі яких написана дисертація, включають як теоретичні дослідження, так і застосування розвиненої теорії до конкретних термоядерних систем – токамака JET, та сферичного тора NSTX. Нижче подано перелік результатів, що мають практичне значення.

Явище трансформації модових номерів кінетичних альфвенових хвиль при їх радіальному поширенні може бути важливим для діагностики плазми, оскільки внаслідок цього явища модові номери, які спостерігаються зовнішніми магнітними зондами можуть відрізнитися від справжніх модових номерів альфвенової моди, яка випроменила ці хвилі. Крім того, це явище може приводити до збільшення області поширення та поглинання хвиль, впливаючи на баланс енергії плазми.

Проведені дослідження “цеберного перенесення” енергійних йонів є корисними для інтерпретації результатів експериментів у режимах з немонотонним профілем коефіцієнту запасу стійкості.

Знаходження максимальної частки енергії швидких йонів, що може відбиратися альфвеновими нестійкостями, та максимального радіального потоку енергії, що може передаватися альфвеновими модами, є корисним для аналізу просторового каналювання енергії швидких йонів у токамаках та стелараторах. Зокрема, отримано оцінки, які показують, що просторове каналювання могло бути основною причиною аномального перенесення енергії під час сильної інжекції нейтральних пучків в сферичному торі NSTX.

Показано, що доцентрове просторове каналювання енергії може пояснити дейтерій-третієві експерименти на токамаку JET, які проводились під час експериментальної кампанії DTE1, де, ймовірно, мали місце аномальне йонне нагрівання та покращення утримання плазми.

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 ім. М.М. Боголюбова НАН України, Харківському національному університеті ім. В. Н. Каразіна. Вони також можуть бути використаними у Інституті фізики плазми Макса Планка (Німеччина), Принстонській лабораторії фізики плазми (США), Калемському науковому центрі (Велика Британія).

**Особистий внесок здобувача.** Роботи, покладені в основу дисертації, виконано в співавторстві. Конкретний особистий внесок здобувача є таким. В роботі [1] здобувачеві належить отримання аналітичного виразу для ширини островів створених у фазовому просторі швидкого йона сайбэнд-резонансами з

альфвеновими власними модами, участь у створенні числових кодів та виконанні числових розрахунків, а також написанні частини тексту. В роботі [2] здобувачеві належить виведення аналітичних виразів для амплітуди трансформованої і нетрансформованої хвиль, а також написання частини тексту. В роботі [3] здобувачеві належить отримання виразів для потоків енергії та частинок при цеберному перенесенні. В роботі [4] здобувачеві належить обчислення просторового каналювання в однорідинній моделі, а також участь у виведенні рівнянь та числових розрахунках. В роботі [5] здобувачеві належать розрахунки радіальної групової швидкості для біжучих хвиль, які утворюють GAE-моди, а також участь у виведенні рівнянь, обговоренні результатів та написанні тексту.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертації доповідалися на 5-ій Технічній конференції МАГАТЕ з теорії нестійкостей в плазмі (Остін, Техас, США, 2011 р.), Міжнародній конференції та школі з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (Харків, 2014 р. та Харків, 2018 р.), 5-ій Міжнародній ITER-школі “МГД та енергійні частинки” (Екс-ан-Прованс, Франція, 2011 р.), Українській конференції з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (Київ, 2011, 2013, 2015, 2019 рр.); Конференції молодих вчених “Проблеми теоретичної фізики” (Київ, 2019 р.); а також на Щорічних конференціях Інституту ядерних досліджень НАН України (2013, 2015, 2017, 2018, 2019 рр.).

**Публікації.** Результати, що викладені в дисертації, опубліковано в 22 наукових роботах, з них 1 стаття у фаховому виданні України, що входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science [1], 4 статті у закордонних фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science [2-5], та 17 тез доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях та нарадах.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає - 140 сторінок, з них основний текст - 104 сторінки. Робота містить 26 рисунків та 2 таблиці. Список використаних джерел налічує 129 найменувань на 15 сторінках.

**Подяки.** Автор щиро вдячний науковому керівнику - доктору фізико-математичних наук Ю.В. Яковенку, та професору, доктору фізико-математичних наук Я.І. Колесниченку за всебічну підтримку та повсякчасну увагу до роботи. Автор щиро вдячний кандидату фізико-математичних наук В.Є. Моїсеєнку за критичні зауваження до дисертації; а також співавторам, з якими було виконано частину робіт, що увійшли до дисертації, особливо доктору фізико-математичних наук В.В. Луценку та співробітникам відділу теорії ядерного синтезу Інституту ядерних досліджень НАН України (м. Київ) за корисні дискусії.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

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

**У першому розділі** показано, що тороїдальність (так само як еліптичність та інші відхилення форми магнітних поверхонь від циліндричної) може мати наслідком лінійну трансформацію кінетичної альфвенової хвилі (Kinetic Alfvén Wave (KAW)) в іншу кінетичну альфвену хвилю, яка відрізняється від початкової хвилі номером моди. Фізичною причиною цих трансформацій є “явище уникнення перетину” (avoided crossing phenomenon). Добре відомо, що зачеплення між двома гілками альфвенового континууму, які характеризуються різними модовими номерами утворює щілину в континуумі біля точки, де ці гілки перетинаються, таким чином усуваючи точку перетину і змінюючи топологію кривих континуума так, що різні гілки з’єднуються. У роботі показано, що подібна трансформація відбувається з гілками дисперсійних кривих KAW.

У першому підрозділі наведено виведення рівнянь для опису двох зачеплених кінетичних альфвенових хвиль. У другому підрозділі зроблений аналіз цих рівнянь і отримано локальне дисперсійне співвідношення для хвиль, які описуються цими рівняннями. Зачеплення гілок дисперсійних кривих KAW на площині  $(k_r, r)$  (де  $r$  – радіальна координата і  $k_r$  – радіальне хвильове число) утворює щілину біля точки перетину двох дисперсійних гілок, з’єднуючи гілки з різними модовими номерами. Можна очікувати, що коли щілина в  $k_r(r)$  є достатньо широкою, більша частка енергії хвилі побіжить по нижній гілці дисперсійного співвідношення, це означатиме трансформацію модового номера хвилі. В той же час, частина енергії хвилі в результаті тунелювання може проникнути до верхньої гілки дисперсійного співвідношення і скласти нетрансформовану хвилю. У третьому підрозділі за допомогою ВКБ-аналізу отримано вирази для коефіцієнтів відбиття  $R$  і проходження  $T$ , які характеризують частку потоку хвилі, яка трансформується, і частку, яка тунелюється. У четвертому підрозділі наведено розрахунки для реальних термоядерних пристроїв. Показано, що трансформація може бути сильною для хвиль з малими поїдальними номерами мод ( $m$ ), впливаючи на велику частку енергії хвилі для  $m \lesssim 5$  в таких термоядерних пристроях як NSTX та ITER.

Трансформація може бути важливою для діагностики, оскільки може змінювати модові номери, які спостерігаються в ході зовнішніх магнітних вимірювань. Амплітуда KAW, яка випромінюється нестійкою модою, може бути порівняна з амплітудою самої моди. Іншим практичним наслідком трансформації KAW є те, що вона збільшує область поширення хвилі. Приклад такої ситуації можна знайти в [Ya.I. Kolesnichenko, Y.V. Yakovenko, A. Weller et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 165004 (2005)]. Велика протяжність області впливу KAW в цій роботі була отримана частково внаслідок припущення, що явище трансформації модового номера, яке вивчається, існує.

**У другому розділі** вивчалось “цеберне перенесення” (bucket transport) перемішування плазми в результаті зміщення енергійних (швидких) йонів, захоплених в резонанс, коли просторова локалізація резонансів змінюється. Було запропоновано гамільтонів формалізм, який застосовний для випадку, коли зміщення резонансів є наслідком зіткненнєвого гальмування частинок та часової еволюції коефіцієнту запасу стійкості (магнітного числа обертів). Знайдено, що гамільтоніан, запропонований в [C. T. Hsu et al., Phys. Rev. Lett. **72**, 2503–2507

(1994)] для вивчення цеберного перенесення, спричиненого чірпінгом частоти, можна використати для вивчення транспорту, пов'язаного зі зіткненням гальмуванням йонів та/або часовою еволюцією профілю  $q$  за наявності статичних збурень. Показано, що незалежно від напрямку руху цебра, потік енергії і потік частинок, спричинений цеберним перенесенням, завжди направлений проти градієнтів, оскільки будь-яке зміщення фазового об'єму, захопленого цебром, завжди супроводжується зсувом фазового об'єму в протилежному напрямку. Ці зміщення резонансних і нерезонансних частинок в протилежних напрямках призводять до перемішування, а не адвекції частинок та енергії. Потоки енергії та частинок, спричинені цеберним перенесенням, зростають зі зменшенням магнітного ширину. Отже цеберне перенесення може бути важливим для гібридного операційного режиму і розрядів з оберненим широм. Також було показано, що цеберні потоки локалізуються на певній відстані від магнітних островів, які спричиняють їх появу. Зокрема, коли  $v_{pr}/v_{||} > 0$  ( $v_{pr}$  - швидкість тороїдальної прецесії частинок,  $v_{||}$  - поздовжня швидкість частинок), потоки енергійних йонів, спричинені подвійними ланцюжками магнітних островів, у розрядах з оберненим широм локалізуються в області між ланцюжками островів – досягаючи свого максимуму поблизу середини цієї області.

**Третій розділ** присвячений просторовому каналюванню енергії швидких йонів альфвеновими хвилями. У першому підрозділі виявлено фізичний механізм передачі енергії поперек магнітного поля ідеальними альфвеновими хвилями в тороїдальній плазмі. Існування альфвенових власних мод в тороїдальній плазмі свідчить про наявність потоку енергії поперек магнітного поля, який відповідає за радіальну структуру моди. Такий потік здається несумісним з властивостями класичних альфвенових хвиль, які поширюються строго вздовж магнітного поля і не призводять до стиснення плазми ( $\nabla \cdot \xi_{\perp} = 0$ ). В першому підрозділі показано, що у власних модах  $\nabla \cdot \xi_{\perp} \neq 0$ . Це означає, що чисті альфвенові хвилі не існують в реалістичній плазмі, яка обмежена в радіальному напрямку. Замість цього існує суміш альфвенових хвиль і швидких магнітозвукових хвиль. Було показано, що в рамках ідеальної МГД поперечний потік енергії біжучих хвиль, які складають моду є  $|S| \propto (\nabla \cdot \xi_{\perp})^2$ ; у випадку альфвенової моди, це означає, що є  $|S| \propto (\omega^2 - k_{||}^2 v_A^2)$ . Зазвичай при дослідженні альфвенових власних мод використовуються редуковані рівняння альфвенових хвиль, отримані в припущенні, що  $\tilde{B} \approx 0$ . Оскільки густина поперечного потоку енергії дорівнює нулю, коли  $\tilde{B}_{||} = 0$ , виникає удаваний парадокс, бо з цих редукованих рівнянь випливає ненульовий енергетичний потік. В першому підрозділі цей парадокс розв'язано і показано, що величину  $\tilde{B}_{||} \neq 0$  можна відтворити з розв'язків рівнянь, отриманих для  $\tilde{B} \approx 0$ .

З практичної точки зору важливо знати групову швидкість в радіальному напрямку ( $v_g$ ). Вона залежить від групової швидкості біжучих хвиль ( $v_g^t$ ), які складають моду. Проте,  $v_g \neq 0$  і поперечне перенесення енергії власними модами мають місце лише за наявності локальних джерел та стоків, які порушують баланс біжучих мод, що рухаються назовні і всередину плазми. Іншими словами,  $v_g \neq 0$ , коли області збудження нестійкості не збігаються з областями, де мода загасає. Можна очікувати, що в такому випадку радіальна структура моди зазнаватиме

впливу. Зроблені оцінки показують, що це може мати місце при реалістичних значеннях  $\gamma/\omega$ . Пораховано радіальні групові швидкості ( $v_g^t$ ) біжучих хвиль, що утворюють GAE-моди та TAE-моди. Вони, як і очікувалось, є набагато меншими за  $v_A$  (на відміну від  $v_g^t$  швидких магнітозвукових мод). Проте, ці швидкості все ще є значними.

В другому підрозділі оцінюється кількість та амплітуди хвиль необхідних для того, щоб утворилась широка стохастична область у фазовому просторі швидких йонів, і хвилі могли отримати значку частку потужності інжекції нейтрального пучка, щоб передати її в іншу просторову область плазми. Отримано аналітичний вираз для ширини островів, створених у фазовому просторі швидкого йона сайдбенд-резонансами з альфвеновими власними модами. Це дає змогу оцінити ширину інтервалу енергій швидких йонів, у якому множинні альфвенові моди здатні створити стохастичну зону, і, отже, частку енергії, яку вони можуть відібрати у цих йонів. Зокрема, виявляється, що порядку 10 GAE-мод (така кількість спектральних ліній нестійкостей спостерігалась у експериментах [D.Stutman et al., Phys. Rev. Lett. 102, 115002 (2009)]) достатньо, щоб відібрати половину енергії швидких йонів у NSTX. Запропоновано та випробувано новий метод знаходження розміру зон перемішування фазового простору частинок (резонансних островів та стохастичних зон) полем кількох хвиль. Метод полягає у відслідковуванні зміщень, які зазнають частинки при одночасному адіабатичному ввімкненні та вимкненні хвиль. Цей метод можна застосовувати для аналізу відбирання енергії групами мод з різними частотами, тоді як карти Пуанкаре – лише тоді, коли частоти мод є однаковими або їх відношення є раціональним числом із малим знаменником. Числові експерименти показали, що результати обчислень адіабатичним методом і методом карт Пуанкаре добре узгоджуються між собою і з аналітичними оцінками в тих випадках, коли таке порівняння є можливим.

**Четвертий розділ** присвячений просторовому каналюванню направленому всередину плазми. Показано, що просторове каналювання може відігравати важливу роль у покращенні характеристик плазми та зростанні йонної температури в експериментах з нагріванням альфа-частинками у токамаку JET. Аналіз проведено в припущенні, що альфа-частинки, які знаходяться на периферії плазми, збуджують множинні швидкі магнітозвукові моди (Fast Magnetoacoustic mode (FMM)), що мають глобальну радіальну структуру. Для того, щоб просторове каналювання забезпечувало передачу енергії альфа-частинок з периферії плазми в центральну область, на периферії плазми має бути значна кількість альфа-частинок з енергіями близькими до 3.5 MeV. У другому підрозділі зроблено оцінки, які показують, що кількість альфа-частинок з енергією 3.5 MeV, що народжуються в периферійній області ( $r/a \geq 0.5$ ) є значною. Для розряду #42856 (JET) ця частка становить  $\sim 30\%$ . Внаслідок орбітального руху частка альфа-частинок в периферійній області зростає. Зокрема, частка захоплених альфа-частинок, що мають  $r_{\max}$  при  $r/a \geq 0.5$  сягає 50% для  $\lambda = 1$  у згаданому розряді. Також у другому підрозділі показано, що необхідну умову для просторового каналювання – резонансну взаємодію між дестабілізованою у периферійній області FMM та основною плазмою у приосьовій області ( $r_i \ll r_a$ ) – можна задовольнити для FMM, частоти яких є близькими до частоти циклотронних

гармонік альфа-частинок. Декремент загасання хвиль у центральній області може лежати у діапазоні  $\gamma_d = (10^{-2}-10^{-4})\omega$ . Ця величина є одного порядку з інкрементом збудження нестійкості, що виникає внаслідок анізотропії функції розподілу периферійних альфа-частинок по швидкостям. Йонно-циклотронна емісія, що спостерігалася на JET та інших токамаках була пов'язана з периферійними FMM-нестійкостями, для яких відношення  $\gamma_d/\omega$  лежить саме в цьому діапазоні. Загасання хвиль у приосьовій області пов'язано як з йонами, так і з електронами. Це означає, що просторове каналювання може передавати енергію альфа-частинок не лише йонам основної плазми, але й електронам. Знайдено умови, що забезпечують загасання хвилі переважно на йонах. Показано, що досить малі амплітуди хвиль є достатніми, щоб забезпечити отримання хвилями і передачу ними поперек магнітних поверхонь стільки густини енергії, скільки необхідно для просторового каналювання значної частки термоядерної енергії.

У третьому підрозділі розглянуто рівняння стаціонарного стану для балансу енергії в реакторі з самопідтримуваним горінням, з припущенням, що просторове каналювання має місце, та показано, що, просторове каналювання може мати сильний вплив на баланс енергії.

У четвертому підрозділі проведено аналіз в рамках реалістичної моделі, що описує як температуру йонів ( $T_i$ ), так і температуру електронів ( $T_e$ ), з параметрами (такими як густини електронів та йонів, потужність нагрівання інжекцією пучків нейтральних атомів, тощо), що взяті з бази даних токамаку JET. Для того, щоб побачити ефект просторового каналювання, були проведені розрахунки для трьох випадків. По-перше, для чистої дейтерієвої плазми з визначеною густиною та нагріванням інжекцією пучків нейтралів. Це дало змогу визначити коефіцієнти теплопровідності електронів та йонів, які потрібні для забезпечення бажаної електронної та йонної температур. По-друге, використовуючи ці коефіцієнти теплопровідності, були проведені розрахунки для дейтерій-третієвої плазми з тим самим нагріванням інжекцією пучків нейтралів. При порівнянні результатів розрахунків для першого та другого випадків, було спостережено ефект нагрівання альфа-частинками. Третій випадок відрізняється від другого лише додаванням просторового каналювання. Просторове каналювання моделювалось з додатковим припущенням, що хвилі загасають внаслідок взаємодії з йонами основної плазми. Показано, що має місце якісне узгодження між електронною та йонною температурами в дейтерій-третієвих розрядах токамаку JET, що виміряні експериментально, та величинами температур, які пораховані чисельно.

Показано, що розвинена теорія доцентрового просторового каналювання енергії може бути поясненням до експериментів на токамаку JET, які проводились під час дейтерій-третієвої експериментальної кампанії (DTE1), де, ймовірно, мали місце аномальне йонне нагрівання та покращення утримання енергії плазми. Виконано аналіз експериментальних даних токамаку JET, який підтвердив висновки роботи [P.R. Thomas et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 5548–5551 (1998)], що енерговміст дейтерій-третієвих розрядів перевищує енерговміст дейтерієвих розрядів, де нагрівання альфа-частинками було замінене на еквівалентне йонно-циклотронне резонансне нагрівання.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вивчено поширення альфвенових хвиль поперек магнітного поля, знайдено потоки енергії поперек магнітного поля, які виникають при взаємодії швидких йонів з магнітогідродинамічними хвилями та магнітними островами, та проведено аналіз фізичних механізмів, що викликають такі потоки. Основні результати, отримані в дисертації:

**1. Вперше показано, що відхилення від циліндричної симетрії (зокрема, тороїдальності) може мати наслідком лінійну трансформацію кінетичної альфвенової хвилі в іншу кінетичну альфвенову хвилю, яка відрізняється номером моди.** Отримано аналітичні вирази для амплітуди трансформованої і нетрансформованої хвиль та знайдено залежність коефіцієнта трансформації від ширини щілини, що утворюється внаслідок “явища уникнення перетину” між гілками альфвенового континуума. Показано, що трансформація може бути сильною для хвиль з малими полоїдальними номерами мод в таких термоядерних пристроях як NSTX та ITER. Трансформація може впливати на модовий склад нестійкості, яка спостерігається під час зовнішніх магнітних вимірювань. Також трансформація може послаблювати загасання Ландау, тим самим збільшуючи область поширення хвилі і, отже, область, у якій хвиля змінює параметри плазми. Результати дисертації підтверджують результати роботи [Ya.I. Kolesnichenko, Y.V. Yakovenko, A. Weller et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 165004 (2005)], в якій велика протяжність області впливу KAW була отримана внаслідок припущення, що мала місце трансформація модового номера хвилі.

**2. Знайдено величину та розташування потоків частинок та енергії, що виникають при цеберному перенесенні внаслідок гальмування швидких йонів в полі квазістаціонарних збурень.** Запропоновано гамільтонів формалізм, придатний для випадку, коли зміщення резонансів є наслідком зіткненневого гальмування частинок та часової еволюції коефіцієнту запасу стійкості. Потік енергії, що створюється цеберним перенесенням, є значним у конфігураціях із малим широм, – отже цеберне перенесення може бути важливим для гібридного операційного режиму і розрядів з оберненим широм. Цеберні потоки локалізуються на певній відстані від магнітних островів, які спричиняють їх появу. Зокрема, в конфігураціях з немонотонним профілем коефіцієнту запасу стійкості цеберний потік енергії має тенденцію зосереджуватись в просторі між магнітними островами.

**3. Виявлено фізичний механізм передачі енергії поперек магнітного поля ідеальними альфвеновими хвилями в тороїдальній плазмі.** Знайдено, що на відміну від класичних альфвенових хвиль у нескінченній плазмі, альфвенові хвилі в тороїдальних системах спричиняють стиснення плазми завдяки зачепленню зі швидкими магнітозвуковими хвилями, що і вможливує передачу енергії. Пораховано радіальну групову швидкість для біжучих хвиль, які утворюють GAE-моди та TAE-моди. Показано, що хоча редуковані рівняння для альфвенових власних мод отримуються в тому наближенні, що поле хвилі, направлене вздовж рівноважного магнітного поля, є відсутнім, з цих рівнянь можна правильно відтворити поздовжнє магнітне поле хвилі, тому вони дають правильний

поперечний потік енергії. Отримані результати пояснюють, як альфвенові власні моди можуть здійснювати просторове каналювання енергії.

**4. Знайдено величину та кількість множинних альфвенових власних моди, при яких ці моди здатні відібрати значну частину енергії швидких йонів для передачі в іншу область простору.** Отримано аналітичний вираз для ширини островів, створених у фазовому просторі швидкого йона сайдбенд-резонансами з альфвеновими власними модами. Таким чином оцінено ширину інтервалу енергій швидких йонів, у якому множинні альфвенові моди здатні створити стохастичну зону, і, отже, частку енергії, яку вони можуть відібрати у цих йонів. Зокрема, виявляється, що порядку 10 GAE-мод (така кількість спектральних ліній нестійкостей спостерігалась у експериментах) достатньо, щоб відібрати половину енергії швидких йонів у NSTX.

**5. Показано, що просторове каналювання може відігравати важливу роль у покращенні характеристик плазми та зростанні йонної температури в експериментах з нагріванням альфа-частинками у токамаку JET.** Аналіз проведено в припущенні, що альфа-частинки, які знаходяться на периферії плазми, збуджують множинні швидкі магнітозвукові моди, що мають глобальну радіальну структуру. Показано, що швидкі магнітозвукові моди з частотами, близькими до циклотронних гармонік альфа-частинок, можуть бути в резонансі з йонами та електронами основної плазми, що знаходяться в центральній області плазми, передаючи енергію альфа-частинок в цю область. Ця передача енергії покращує загальне утримання енергії в плазмі. Окрім того, вона може спричиняти аномальне нагрівання йонів, коли загасання швидких магнітозвукових мод на йонах переважає над загасанням швидких магнітозвукових мод на електронах. Знайдено умови, що забезпечують загасання FMM переважно на йонах. Пораховано швидкість загасання розглянутих хвиль. Показано, що досить малі амплітуди хвиль є достатніми, щоб забезпечити отримання хвилями і передачу ними поперек магнітних поверхонь енергії з густиною, що є необхідною для просторового каналювання значної частки термоядерної енергії. Показано, що розвинена теорія доцентрового просторового каналювання енергії може пояснювати ті дейтерій-третієві експерименти на токамаку JET, які проводились під час кампанії DTE1, де, ймовірно, мали місце аномальне йонне нагрівання та покращення утримання плазми.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:*

1. **Tyshchenko M.H., Yakovenko Yu.V.** Spatial energy channeling and stochastization of fast ion motion by high-frequency plasma instabilities // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2015. №1(95). P. 49-52. (Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить отримання аналітичного виразу для ширини резонансного острова, створеного альфвеновою власною

модою в фазовому просторі, участь у створенні числових кодів та виконанні числових розрахунків, а також написанні частини тексту.) (Видання входить до Scopus та Web of Science).

**Наукові праці у зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз:**

2. **Tyshchenko M.H.**, Yakovenko Yu.V. Transformations of kinetic Alfvén waves in toroidal plasmas // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2012. Vol. 54, № 6. P. 065002. (Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить виведення аналітичних виразів для амплітуди трансформованої і нетрансформованої хвиль, а також участь у написанні частини тексту.) (Видання входить до Scopus та Web of Science).
3. Yakovenko Yu.V., Burdo O.S., Kolesnichenko Ya.I., **Tyshchenko M.H.** Bucket transport of energetic ions in tokamaks // Physics Letters A. 2015. Vol. 379, №36. P. 2062-2067. (Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить отримання виразів для потоків енергії та частинок при цеберному перенесенні.) (Видання входить до Scopus та Web of Science).
4. Kolesnichenko Ya.I., Lutsenko V.V., **Tyshchenko M.H.**, Weisen H., Yakovenko Yu.V. and JET Contributors. Analysis of possible improvement of the plasma performance in JET due to the inward spatial channelling of fastion energy // Nuclear Fusion. 2018. Vol. 58, № 7. P. 076012. (Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить обчислення просторового каналювання в однорідинній моделі, а також участь у виведенні рівнянь та числових розрахунках.) (Видання входить до Scopus та Web of Science).
5. Kolesnichenko Ya.I., Yakovenko Yu.V., **Tyshchenko M.H.** Mechanisms of the energy transfer across the magnetic field by Alfvén waves in toroidal plasmas // Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25, № 12. P. 122508. (Особистий внесок здобувача: здобувачеві належать розрахунки радіальної групової швидкості для біжущих хвиль, які утворюють GAE-моди, а також участь у виведенні рівнянь, обговоренні результатів та написанні тексту.) (Видання входить до Scopus та Web of Science).

**Наукові праці, які засвідчують апробацію результатів дисертації**

6. **Tyshchenko M.H.**, Yakovenko Yu.V. Transformations of kinetic Alfvén waves in toroidal plasmas // MHD and Energetic Particles : 5th ITER International Summer School, June 20-24, 2011, Faculte de Droit et des Science Politique d'Aix Marseille, Aix en Provence, France, Programme and Abstract book. P. 64. (Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить виведення аналітичних виразів для амплітуди трансформованої і нетрансформованої хвиль, участь в обговоренні результатів.)
7. **Tyshchenko M.H.**, Yakovenko Yu.V. Transformations of mode numbers of kinetic Alfvén waves in toroidal plasmas // 5th IAEA Technical Meeting on The Theory of Plasma Instabilities : Program and Abstracts of International Conference, 5-

10 September, 2011, Austin, Texas USA. Vienna, 2011. P. 28. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить виведення аналітичних виразів для амплітуди трансформованої і нетрансформованої хвиль, участь в обговоренні результатів.*)

8. **Тищенко М.Г., Яковенко Ю.В.** Трансформація модових номерів кінетичних альфвенових хвиль у тороїдальній плазмі // Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу : програма, збірник анотацій, список учасників конференції, 25-26 жовтня 2011 р. Київ, 2011. С. 21. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить виведення аналітичних виразів для амплітуди трансформованої і нетрансформованої хвиль, участь в обговоренні результатів.*)
9. **Тищенко М.Г., Яковенко Ю.В.** Ширина резонансів при взаємодії швидких йонів із множинними альфвеновими нестійкостями // Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАНУ : тези доповідей XX щорічної наукової конференції, 28 січня-01 лютого 2013 р. Київ, 2013. С. 143-144. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить отримання аналітичного виразу для ширини резонансного острова, участь у написанні числового коду, числові розрахунки та участь в обговоренні результатів.*)
10. **Тищенко М.Г., Яковенко Ю.В.** Дослідження стохастизації руху швидких йонів високочастотними нестійкостями плазми та просторового каналювання енергії в реакторі ITER // Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу : програма, збірник анотацій, список учасників конференції, 24-25 вересня 2013 р. Київ, 2013. С. 17. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить виведення аналітичного виразу для ширини резонансного острова, участь у написанні числового коду, числові розрахунки та участь в обговоренні результатів.*)
11. **Tyshchenko M.H., Yakovenko Yu.V.** Spatial energy channelling and stochastization of fast ion motion by high-frequency plasma instabilities // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion : Book of Abstracts of International Conference, 15-18 September 2014, Kharkiv, Ukraine. Kharkiv, 2014. P. 42. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить отримання аналітичного виразу для ширини резонансного острова, участь у написанні числового коду, числові розрахунки та участь в обговоренні результатів.*)
12. **Тищенко М.Г., Яковенко Ю.В.** Дослідження просторового каналювання енергії та стохастизації руху швидких йонів високочастотними нестійкостями плазми // Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : тези доповідей XXII щорічної наукової конференції, 26-30 січня 2015 р. Київ, 2015. С. 152-153. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить отримання аналітичного виразу для ширини резонансного острова, участь у написанні числового коду, числові розрахунки та участь в обговоренні результатів.*)
13. **Яковенко Ю.В., Бурдо О.С., Колесниченко Я.І., Тищенко М.Г.** Регулярна та стохастична динаміка швидких йонів за наявності квазістаціонарних магнітних збурень // Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : тези доповідей XXII щорічної наукової конференції, 26-30 січня

2015 р. Київ, 2015. С. 160. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить отримання виразів для потоків енергії та частинок при цєберному перенесенні.*)

14. Яковенко Ю.В., Бурдо О.С., Колесниченко Я.І., **Тищенко М.Г.** Цєберне перенесення надтеплових йонів у токамаках // Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу : програма, збірник анотацій, список учасників конференції, 22-23 вересня 2015 р., Київ, 2015. С. 5. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить отримання виразів для потоків енергії та частинок при цєберному перенесенні.*)
15. **Тищенко М.Г.**, Яковенко Ю.В. Числове дослідження стохастизації руху частинок множинними альфвеновими збуреннями // Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу : програма, збірник анотацій, список учасників конференції, 22-23 вересня 2015 р. Київ, 2015. С. 22. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить участь у створенні числового коду та числові розрахунки; доповідач.*)
16. Колесниченко Я.І., **Тищенко М.Г.**, Яковенко Ю.В. Просторове каналювання енергії в плазмі зі швидкими йонами // Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : тези доповідей XXIV щорічної наукової конференції, 10-13 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 173-174. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належать розрахунки радіальної групової швидкості для біжучих хвиль, які утворюють GAE-моди.*)
17. Колесниченко Я.І., Луценко В.В., **Тищенко М.Г.**, Вейсен Г., Яковенко Ю.В. Аналіз можливого покращення характеристик плазми у токамаці JET завдяки направленому всередину просторовому каналюванню енергії швидких йонів // Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : тези доповідей XXV щорічної наукової конференції, 16-20 квітня 2018 р. Київ, 2018. С. 157. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить участь у виведенні рівнянь та частина числових розрахунків.*)
18. **Tyshchenko M.H.**, Kolesnichenko Ya.I., Lutsenko V.V., Yakovenko Yu.V. Spatial energy transfer by fast magnetoacoustic modes in a one-fluid model // Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : тези доповідей XXV щорічної наукової конференції, 16-20 квітня 2018 р. Київ, 2018. С. 165-166. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належить обчислення просторового каналювання в однорідній моделі.*)
19. Kolesnichenko Ya.I., Yakovenko Yu.V., **Tyshchenko M.H.** Spatial energy channeling in plasmas with fast ions // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion : book of abstracts of International Conference, 10-13 September, Kharkiv, Ukraine. Kharkiv, 2018. P. 181. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належать розрахунки радіальної групової швидкості для біжучих хвиль, які утворюють GAE-моди та участь у виведенні рівнянь.*)
20. **Tyshchenko M.H.**, Kolesnichenko Ya.I., Yakovenko Yu.V. Mechanism of the energy transfer across the magnetic field by Alfvén waves in toroidal plasmas // щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України : тези доповідей XXVI щорічної наукової конференції, 8-12 квітня 2019 р. Київ, 2019. С. 137. (*Особистий внесок здобувача: здобувачеві належать розрахунки*

*радіальної групової швидкості для біжучих хвиль, які утворюють GAE-моди та участь у виведенні рівнянь.)*

21. Колесниченко Я.І., Яковенко Ю.В., **Тищенко М.Г.** Потік енергії поперек магнітного поля в альфвенових хвилях // Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу : програма, збірник анотацій, список учасників конференції, 11-12 грудня 2019 р. Київ, 2019, С. 30. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належать розрахунки радіальної групової швидкості для біжучих хвиль, які утворюють GAE-моди та участь у виведенні рівнянь.)*
22. Kolesnichenko Ya.I., Yakovenko Yu.V., **Tyshchenko M.H.** Transverse energy transfer by Alfvén waves in toroidal plasmas // Problems of Theoretical Physics : Book of Abstracts of X Conference of Young Scientists, 23-24 December, 2019. Kyiv, 2019. P. 14. *(Особистий внесок здобувача: здобувачеві належать розрахунки радіальної групової швидкості для біжучих хвиль, які утворюють GAE-моди та участь у виведенні рівнянь.)*

## АНОТАЦІЯ

**Тищенко М. Г.** Поширення альфвенових хвиль та перенесення енергії поперек магнітних поверхонь у тороїдальній плазмі. – 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, – Харків, 2021.

В дисертації проаналізовано зміни модової структури кінетичних альфвенових хвиль при їх поширенні поперек тороїдного магнітного поля. Отримано аналітичні вирази для амплітуд трансформованої і нетрансформованої хвиль. Показано, що трансформація може бути сильною для хвиль з малими поперіодальними номерами мод, зокрема в таких термоядерних пристроях як NSTX (США) та ITER (Франція).

Знайдено величину та розташування потоків частинок та енергії, що виникають при цеберному перенесенні внаслідок гальмування швидких йонів в полі квазістаціонарних збурень.

Виявлено фізичний механізм передачі енергії поперек магнітного поля ідеальними альфвеновими хвилями в тороїдальній плазмі. Знайдено, що у нескінченній плазмі альфвенові хвилі в тороїдальних системах спричиняють стиснення плазми завдяки зачепленню зі швидкими магнітозвуковими хвилями, що і вможливорює передачу енергії. Пораховано максимальний енергетичний потік, що може передаватися поперек магнітного поля GAE-модами та TAE-модами, коли збудження моди швидкими йонами та поглинання її енергії термічною плазмою є розділеними в просторі. З'ясовано умови, за яких множинні альфвенові власні моди здатні відібрати значну частку енергії швидких йонів для можливої передачі в іншу область простору. Отримано оцінки, які показують, що просторове каналювання могло бути основною причиною аномального перенесення енергії під час сильної інжекції нейтральних пучків в сферичному торі NSTX.

Показано, що просторове каналювання може відігравати важливу роль у покращенні характеристик плазми та зростанні йонної температури в експериментах з нагріванням альфа-частинками у токамаку JET.

**Ключові слова:** токамак, енергійні йони, транспорт, резонансні острови, альфвенові хвилі, власні моди, нестійкості плазми.

## ABSTRACT

**Tyshchenko M. H.** Propagation of Alfvén waves and energy transfer across magnetic surfaces in toroidal plasmas. – Manuscript.

Thesis for the Candidate of Science (Doctor of Philosophy) degree in Physics and Mathematics, speciality 01.04.08 – Plasma Physics. – Institute for Nuclear Research, National Academy of Science of Ukraine; V. N. Karazin Kharkiv National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, – Kharkiv, 2021.

This dissertation is devoted to current problems of the physics of magnetohydrodynamic waves in toroidal fusion devices. It presents results of theoretical investigation of physics of the transverse energy transfer by Alfvén waves and magnetic islands, and of effects of the spatial channelling of the energy of energetic ions/alpha particles by destabilized Alfvén eigenmodes in tokamaks. The developed theory is applied to experimental data from the spherical torus NSTX (USA) and tokamak JET (United Kingdom).

It is demonstrated that toroidicity (as well as ellipticity and other kinds of deviations of the magnetic configuration from the cylindrical geometry) can result in linear transformations of propagating kinetic Alfvén waves (KAWs) into other KAW branches, which differ by their mode numbers from the initial waves. Analytical expressions for the amplitudes of the transformed and non-transformed waves are derived. The transformation is found to be strong for kinetic Alfvén waves with low poloidal mode numbers in typical tokamaks, NSTX and ITER (France). It may affect the mode numbers observed by external magnetic measurements and weaken the Landau damping of the waves, thus extending the region of the wave propagation. The latter can be important when the wave affects the plasma energy balance transferring the energy or modifying the plasma transport coefficients.

The so-called “bucket transport” of energetic ions - the spatial mixing of these ions due to spatial displacement of resonances - is studied with special attention to quasi-steady-state magnetic perturbations. A Hamiltonian formalism suitable to the case when the resonance displacement results from the collisional slowing down of the particles and the temporal evolution of the safety factor profile is suggested. Regardless of the direction of the bucket motion, the particle and energy fluxes caused by the bucket transport are always directed against the gradients. The reason for this is in the fact that any displacement of the phase volume enclosed by the buckets is always accompanied by a displacement of phase volume in the opposite direction. These opposite displacements of resonant and non-resonant particles result in mixing rather than advection of particles and energy. The energy flux produced due to the bucket transport is shown to be considerable in configurations with low shear. The bucket transport may be of importance in the hybrid operation mode and in reversed-shear discharges.

Physics of the transverse energy transfer by ideal Alfvén waves in toroidal plasmas is elucidated. It is found that, in contrast to the classical Alfvén waves in infinite plasmas, the Alfvén waves in toroidal systems produce plasma compression due to coupling with fast magnetoacoustic waves, which provides the energy transfer. The eigenmode group velocity in the radial direction depends on the group velocity of traveling waves constituting the mode. Non-zero group velocity and the transverse energy transfer by eigenmodes take place only in the presence of local sources and sinks which break the balance of the traveling modes moving outwards and inwards. The radial group velocities of the traveling waves constituting the Global Alfvén Eigenmodes (GAE) and Toroidicity-induced Alfvén Eigenmodes (TAE) are calculated. It is shown that equations for Alfvén eigenmodes derived in the approximation of vanishing wave field along the equilibrium magnetic field reproduce the longitudinal magnetic field of the wave and lead to correct transverse energy flux. The obtained results explain how Alfvén eigenmodes can provide the spatial energy channeling – the transfer of the energy by these modes from the unstable plasma region to the region where the mode damping dominates.

The conditions are established when multiple Alfvén eigenmodes are able to withdraw a significant part of the energy of fast ions for possible transfer to another spatial region. An analytical expression for the width of a resonance island induced by the sideband resonances with Alfvén eigenmodes in the fast ion phase space is derived. It is calculated that about 10 GAE modes (spectrograms of instabilities in NSTX show that such a number of unstable modes are observed simultaneously) are sufficient to extract a half of the fast ion energy.

It is found that spatial channeling may have played a role in the improved confinement and increased ion temperature in JET experiments with alpha particle heating. Analysis is carried out in the assumption that alpha particles located in the peripheral region of the plasma destabilize multiple fast magnetoacoustic modes having global radial structure. The fast magnetoacoustic modes with the frequencies close to cyclotron harmonics of alpha particles are considered. It is found that these fast magnetoacoustic modes can be in resonance with the bulk plasma ions and electrons located in the central region of the plasma, delivering the alpha energy to this region. This improves the heating efficiency and overall plasma confinement. In addition, it leads to anomalous ion heating when the ion damping of fast magnetoacoustic mode exceeds the electron one. The damping rates of the considered waves are calculated. Conditions providing dominant ion damping are found. Reasonably small amplitude waves can receive and transfer across the flux surfaces as large power density as that required for spatial channeling of a considerable part of fusion energy. The developed theory of the inward spatial channeling is applied to JET experiments carried out during the deuterium–tritium-experiment campaign (DTE1), where presumably anomalous ion heating and improvement of the plasma confinement took place. An analysis of JET experimental data was carried out, which confirmed the conclusion of [P.R. Thomas et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 5548–5551 (1998)] that the energy content in deuterium–tritium discharges exceeds that in deuterium discharges with alpha power substituted by ion cyclotron resonance heating power.

**Keywords:** tokamak, energetic ions, transport, resonance islands, Alfvén waves, eigenmodes, plasma instabilities.

## АННОТАЦИЯ

**Тищенко М.Г.** Распространение альфвеновских волн и перенос энергии поперек магнитных поверхностей в тороидальной плазме. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. – Институт ядерных исследований Национальной академии наук Украины; Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2021.

В диссертации проанализированы изменения модовой структуры кинетических альфвеновских волн при их распространении поперек тороидного магнитного поля. Получены аналитические выражения для амплитуд трансформированной и нетрансформированной волн. Показано, что трансформация может быть сильной для волн с низкими полоидальными номерами мод, в частности, в таких термоядерных устройствах как NSTX (США) и ITER (Франция).

Найдены величина и положение потоков частичек и энергии, которые возникают при “бакет”-транспорте в результате торможения быстрых ионов в поле квазистационарных возмущений.

Выявлен физический механизм переноса энергии поперек магнитного поля идеальными альфвеновскими волнами в тороидальной плазме. Обнаружено, что альфвеновские волны в тороидальных системах создают сжатие плазмы за счет зацепления с быстрыми магнитозвуковыми волнами, что обеспечивает передачу энергии. Посчитана радиальная групповая скорость бегущих волн, составляющих глобальные GAE-моды и TAE-моды. Установлены условия, при которых множественные альфвеновские собственные моды способны отбирать значительную часть энергии быстрых ионов для возможной передачи в другую область пространства. Получены оценки, которые показывают, что пространственное каналирование могло быть основной причиной аномального переноса энергии во время сильной инжекции нейтральный пучков в сферическом торе NSTX.

Обнаружено, что пространственное каналирование могло сыграть важную роль в улучшении характеристик плазмы и увеличении температуры ионов в экспериментах с нагревом альфа-частицами в токамаке JET (Великобритания).

**Ключевые слова:** токамак, надтепловые ионы, перенос, резонансные острова, альфвеновские волны, собственные моды, неустойчивости плазмы.