

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА**

ГРИШАНОВ Микола Іванович

УДК 533.951

**„ДИЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАЗМИ БЕЗ ЗІТКНЕНЬ У
ДВОВИМІРНО-НЕОДНОРІДНИХ АКСІАЛЬНО-СИМЕТРИЧНИХ
МАГНІТНИХ ПАСТКАХ”**

01.04.08 - фізика плазми

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук**

Харків – 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті високих технологій Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України **АЗАРЕНКОВ Микола Олексійович**, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, проректор.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор **Черемних Олег Костянтинович**, Інститут космічних досліджень НАН України та НКА України, заступник

директора з наукової роботи;

доктор фізико-математичних наук, професор
Єгоренков Володимир Дмитрович, Харківський
національний університет імені В.Н. Каразіна, професор
фізичного факультету;

доктор фізико-математичних наук
Греков Дмитро Леонідович, Інститут фізики плазми
Національного наукового центру „Харківський фізико-
технічний інститут” НАН України, провідний науковий
співробітник.

Захист відбудеться «_14_» _березня_ 2008 р. о _15.00_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна за адресою: 61108, м. Харків, пр. Курчатова, 31, аудиторія 301.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61077, м. Харків, площа Свободи, 4.

Автореферат розісланий «_12_» _лютого_ 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Письменецький С.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В дисертації у кінетичному наближенні вивчаються діелектричні властивості аксіально-симетричних плазмових конфігурацій, таких як плазмовий циліндр у прямому та гвинтовому магнітних полях; токамак з великим та малим аспекним відношенням, з коловим, еліптичним та D-подібним перерізом концентричних магнітних поверхонь; D-подібна тороїдна плазма в умовах рівноваги за Соловйовим; магнітний пробкотрон; магнітосферна плазма у полі точкового та лабораторного магнітного диполя. Отримана інформація необхідна для розвитку кінетичної теорії хвиль у системах з двовимірною (2D) неоднорідністю параметрів плазми і утримуючого магнітного поля. Актуальність теми дисертації зумовлена тим, що дослідження хвильових процесів відносяться до фундаментальних у фізиці плазми. Вони базуються на розв'язанні рівнянь Максвелла для електромагнітних полів і густини електричного струму. Як відомо, для розвитку лінійної теорії необхідно знати компоненти тензору діелектричної проникності для високочастотних (ВЧ) хвиль малої амплітуди. Форма цих компонент істотно залежить від моделі плазми і рівноважного магнітного поля, від системи координат у геометричному просторі, від частотного діапазону та інших умов. Найбільш повна інформація про діелектричні характеристики плазми та взаємодію хвиля-частинка отримується шляхом розв'язання кінетичних рівнянь (рівняння Власова у плазмі без зіткнень) для функції розподілу заряджених частинок у фазовому просторі. Інтерес до кінетичної теорії хвиль в замагніченій плазмі викликаний у першу чергу практичними застосуваннями плазми в експериментальних пристроях (токамаки, стеларатори, пробкотрони, магнітосферна плазма у полі лабораторного магнітного диполя) і у космосі (сонячна корона, сонячний вітер, магнітосфера Землі та інших планет). Підтвердженням цьому є розвиток ВЧ методів додаткового нагрівання плазми, підтримування безіндукційного струму та вилучення домішок в тороїдних і циліндричних пастках, коли використовується беззіткненне поглинання ВЧ хвиль на частинках (електронах або іонах) у відповідних діапазонах частот.

Результатом розв'язання рівнянь Максвелла-Власова має бути відповідь на питання про просторову структуру електромагнітних полів у плазмових конфігураціях, про дисперсійні характеристики власних коливань, про умови баунс-резонансної взаємодії хвиля-частинка у криволінійному магнітному полі, про умови збудження, поширення і загасання хвиль в аксіально-симетричній плазмі. Через складності розв'язку 2D інтегро-диференціальних рівнянь навіть лінійну кінетичну теорію хвиль у тороїдній плазмі не можна вважати завершеною. Зараз можна вважати достатньо розробленими моделі одновимірної (1D) циліндричної плазми, що утримується прямим або гвинтовим магнітним полем. Важливою особливістю цих моделей є аксіальна симетрія та радіальна неоднорідність стаціонарних параметрів. Для опису таких систем і розв'язку рівнянь Власова-Максвелла зручно використати циліндричні координати. При цьому стає зрозумілим, що плоскі хвилі вже не є власними функціями задачі і класична теорія плоских хвиль має бути модифікована. Формально, модель плазмового циліндра у прямому полі зручна при дослідженні хвильових процесів у центральній частині магнітного пробкотрона, у сонячному вітрі, у

екваторіальній площині магнітосфери Землі. Моделі плазмового циліндру зі струмом (тобто з гвинтовим магнітним полем) та тотожними торцями довгий час успішно використовувалися при моделюванні ВЧ нагрівання і генерації безіндукційних струмів у тороїдній плазмі. Однак, істотною властивістю токамаків, стелараторів, магнітосфери Землі та інших відкритих пасток є 2D (а часом і 3D) неоднорідність рівноважних параметрів плазми і утримуючого магнітного поля, що змушувало розвивати відповідні 2D (та 3D) моделі плазми. Наші дослідження орієнтовані, у першу чергу, на вивчення діелектричних властивостей у 2D моделях циліндричної, тороїдної та магнітосферної плазми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалась як частина досліджень, що проводились в Сухумському фізико-технічному інституті за темами „Дослідження альфвенівського нагрівання плазми в установках типу токамак” (№ держреєстрації *У-18071*), „Дослідження газодинамічної пастки з ВЧ нагріванням та плазмового фокусу з метою отримання потужних джерел жорсткого випромінювання” (№ держреєстрації *У-2200Р*); в Університеті штату Ріо де Жанейро „Вплив дрейфово-кінетичних ефектів на хвилеві властивості у тороїдній та магнітосферній плазмі” (№ реєстрації *FAPERJ-E-26/150951/96*), „Двовимірна кінетична теорія високочастотних хвиль у магнітосферній плазмі та у токамаків з малим аспектним відношенням” (№ реєстрації *FAPERJ-E-26/150.843/2000*); в Національній (Бразилія) лабораторії наукового програмування „Комп'ютерне моделювання хвилевих процесів в замагніченій плазмі токамаків та магнітосфери Землі” (№ реєстрації *CNPq-300637/01-2*), в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна „Збудження іонно-циклотронних хвиль в двовимірно-неоднорідних магнітних уловлювачах відкритого типу (магнітосфера Землі, плазмовий пробкотрон)” (№ реєстрації *05-07*).

Мета і задачі досліджень. Основною метою дисертації є отримання компонент діелектричного тензора і розвиток кінетичної теорії хвиль в таких аксіально-симетричних плазмових системах без зіткнень, як

- плазмові циліндри у прямому та гвинтовому магнітному полі;
- токамаки з великим і малим аспектним відношенням, з концентричними магнітними поверхнями колового, еліптичного і D-подібного перерізу; D-подібні токамаки з рівновагою за Соловйовим та довільним аспектним відношенням;
- циліндрична плазма у пробкотроні з магнітними дзеркалами;
- магнітосферна плазма у полі лабораторного магнітного диполя, у полі точкового геомагнітного диполя, у полі з коловими силовими лініями.

Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити такі задачі:

- * Сформулювати стаціонарні стани рівноважного магнітного поля і функції розподілу заряджених частинок у просторі швидкостей для вище названих 1D та 2D моделей плазми.
- * Розробити метод розв'язання кінетичних рівнянь Власова для пролітних та запертих частинок для 2D моделей плазми.
- * Розрахувати внесок пролітних та запертих частинок до 2D компонент густини електричного струму і до компонент тензору діелектричної проникності при урахуванні циклотронних та баунс-резонансів в тороїдній, магнітосферній та пробкотронній плазмах.

- * Отримати дисперсійні співвідношення для власних коливань 1D або 2D моделі плазми у діапазоні частот альфвенівського та іонно-циклотронного резонансів.
- * Числовими та аналітичними методами проаналізувати дисперсійні характеристики електромагнітних хвиль в тороїдній, магнітосферній і пробкотронній плазмі.
- * Оцінити ВЧ потужність, що поглинається у 2D моделях плазми за рахунок черенковського або основного іонно-циклотронного резонансів з пролітними та запертими частинками.

Об'єкт дослідження – аксіально-симетрична плазма без зіткнень у магнітному полі з 1D та 2D неоднорідністю стаціонарних параметрів плазми та утримуючого магнітного поля; відгук циліндричної, тороїдної і магнітосферної плазми на збурення електромагнітних полів у рамках лінійної теорії хвиль.

Предмет дослідження – тензор діелектричної проникності, дисперсійні характеристики, засоби збудження і поглинання власних коливань у 1D і 2D аксіально-симетричних системах, що пов'язані з конкретною геометрією утримуючого магнітного поля, розподілом плазмових параметрів та частотним діапазоном ВЧ полів; особливості взаємодії пролітних і запертих частинок з електромагнітними хвилями у двовимірній-неоднорідних плазмових конфігураціях в умовах черенковського та циклотронного резонансів.

Методи досліджень. В дисертації використані добре відомі методи теорії диференціальних рівнянь та аналітичної геометрії, теорії функцій комплексних змінних, асимптотичні методи, метод усереднення, метод малого параметру, метод стаціонарних фаз. Використані результати теорії спеціальних циліндричних та еліптичних функцій, повних і неповних еліптичних інтегралів першого, другого і третього роду, інтеграл ймовірності від комплексного аргументу.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше, на моделі однорідного плазмового циліндру у прямому магнітному полі, продемонстрована можливість сепарації ізотопів (або іонів домішок) за допомогою збудження двох біжучих циліндричних хвиль, котрі мають частоти близькі до частот ларморівського обертання ізотопів (іонів домішок) і поширюються у протилежному напрямку.

Вперше, на моделі плазмового пробкотрону з магнітними дзеркалами, у наближенні геометричної оптики, проаналізована просторова структура швидких альфвенівських та швидких магнітозвукових хвиль уздовж пробкотрону при фіксованих радіальних хвилевих числах. У діапазоні іонно-циклотронних частот (і нижче) отримані дисперсійні залежності, які зв'язують власні частоти і хвилові числа при резонансному збудженні цих коливань у плазмі з одним або двома сортами іонів. Визначені точки відсічення для зони поширення швидких магнітозвукових хвиль; отримано вираз для критичної густини плазми, при перевищенні якої стає можливим резонансне збудження цих хвиль. Розібрано вплив домішки дейтерію на хвилові процеси у такому плазмовому пробкотроні.

Вперше, на основі розв'язку рівнянь Власова для запертих частинок в 2D моделі циліндричного пробкотрона, отримані аналітичні вирази для елементів поздовжньої та поперечних компонент тензора діелектричної проникності, які придатні для чисельних розрахунків по альфвенівському та іонно-циклотронному нагрівання плазми в пастках відкритого типу. Проаналізовано вплив баунс-

резонансних ефектів на поглинання хвиль у плазмовому пробкотроні. Доведено, що умови резонансної взаємодії хвилі із запертими частинками у 2D пробкотроні істотно відрізняються від умов резонансу у прямому магнітному полі. З цієї причини беззіткненна дисипація хвиль на запертих частинках у плазмовому пробкотроні істотно відрізняється від черенковського та циклотронного поглинання хвиль в плазмі з прямим магнітним полем.

Вперше розв'язані рівняння Власова для збурень функцій розподілу запертих і пролітних частинок в осесиметричних сферичних токамаках з коловим, еліптичним і D-подібним перерізом магнітних поверхонь, та в токамаках з рівновагою за Соловйовим. На основі цих розв'язків уперше отримані елементи поздовжньої та поперечних компонент тензора діелектричної проникності у цих моделях тороїдної плазми, які необхідні для розрахунків поглинання хвиль за рахунок іонно-циклотронного та електронного загасання Ландау у діапазоні частот швидких магнітозвукових та альфвенівських хвиль в токамаках з довільним аспектним відношенням.

Вперше доведено, що у токамаках з витягнутим перерізом магнітних поверхонь поряд зі звичними запертими та пролітними частинками можуть виникати додаткові групи запертих частинок на таких поверхнях, де рівноважне магнітне поле має два (і більше) локальних мінімуми. Для еліптичних токамаків отримано критерій існування додаткових запертих частинок, який зв'язує еліптичність, обернене аспектне відношення та запас стійкості на заданій магнітній поверхні.

Вперше розроблені числові коди для розрахунку внесків запертих і пролітних електронів в уявну частину поздовжньої проникності ВЧ полів в широкому діапазоні частот у плазмі токамаків із коловим, еліптичним і D-подібним перерізом магнітних поверхонь при довільному аспектному відношенні. Розрахунки дозволяють визначити внесок окремих баунс-резонансних членів, як запертих, так і пролітних частинок, в черенковське поглинання альфвенівських та швидких магнітозвукових хвиль у 2D тороїдній плазмі. Для токамаків з еліптичними магнітними поверхнями вперше проаналізоване поглинання TAE мод (*Toroidicity-induced Alfvén Eigenmodes*) поблизу раціональних магнітних поверхонь, де паралельна компонента хвилевого вектору міняє знак.

Вперше запропоновано метод розв'язку кінетичних рівнянь для функції розподілу запертих і пролітних частинок у 2D магнітосферній плазмі без зіткнень, як задачі з граничними умовами. Розглянуто 2D моделі рівноважної (максвелівської) плазми у полі точкового та лабораторного магнітного диполя, та магнітосферної плазми с коловими силовими лініями геомагнітного поля. Для цих моделей вперше отримано елементи поздовжньої та поперечних компонент тензора діелектричної проникності у діапазоні частот альфвенівських хвиль і іонно-циклотронного резонансу. Проаналізовано вплив баунс-резонансів на черенковське поглинання альфвенівських хвиль в 2D лабораторній і навколоземній магнітосферній плазмі.

Вперше проведено теоретичне дослідження впливу циклотронних і баунс-резонансів на стійкість ліво- і право-поляризованих хвиль у магнітосферній плазмі з анізотропною температурою. Отримані дисперсійні рівняння для іонно- та електронно-циклотронних хвиль, що поширюються вдовж силової лінії

геомагнітного поля Землі. Проаналізовані дисперсійні характеристики іонно-циклотронних хвиль у 2D магнітосфері Землі в зоні геостаціонарних орбіт при урахуванні баунс-резонансної взаємодії з енергійними протонами.

Наукове значення роботи. Результати, отримані в дисертації, є внеском в кінетичну теорію електромагнітних хвиль у двовимірній-неоднорідних аксіально-симетричних плазмових системах, таких як токамаки з великим та малим аспектним відношенням, магнітосфера Землі та інших планет, магнітосферна плазма у лабораторних умовах, плазмові пробкотрони.

Практичне значення здобутих результатів. Наукові результати, які отримані в дисертації, належать до актуальних галузей фізики космічної та лабораторної плазми, що інтенсивно розвиваються і мають бути цікаві світовій науковій спільноті. Проведені дослідження показали, що одержані результати можуть бути застосовані для аналізу хвилевих процесів в тороїдній, магнітосферній і пробкотронній плазмах. Отримані компоненти тензору діелектричної проникності можуть бути використані для розвитку чисельних кодів розв'язку 2D рівнянь Максвелла для електромагнітних полів у названих моделях плазми. Головна особливість отриманих діелектричних характеристик є та, що вони можуть бути розраховані чисельними методами незалежно від рішення рівнянь Максвелла. Відповідні розрахунки внеску пролітних та запертих електронів в уявну частину елементів подовжньої діелектричної проникності дозволили аналізувати черенковське поглинання альфвенівських та швидких магнітозвукових хвиль у таких токамаках як JET (*Joint European Torus, UK*), MAST (*Mega-Ampere Spherical Tokamak, UK*), NSTX (*National Spherical Tokamak eXperiment, USA*), START (*Small Tight Aspect Ratio Tokamak, UK*), TCABR (*Tokamak Chauffage Alfvén do BRasil, Brazil*), ETE (*Experimento de Tokamak Esferico, Brazil*) та в експериментальній пастці LDX (*Levitated Dipole eXperiment, USA*), де плазма утримується полем лабораторного магнітного диполя. Через дослідження умов збудження іонно-циклотронних хвиль поблизу геостаціонарних орбіт магнітосфери Землі доведено, що інкременти нестійкості цих хвиль, які отримані на моделі 2D магнітосфери, значно менше відповідних виразів для плазми у прямому магнітному полі. Проведені дослідження підтверджують необхідність розвитку 2D кінетичної теорії хвиль у плазмі навколоземної магнітосфери, токамаків та інших плазмових пастках відкритого і замкненого типу.

Особистий внесок здобувача. У роботах [1-5] дисертантові належить участь у постановці задач, проведенні аналітичних розрахунків та написанні статей. У роботах [6-24] - постановка задач, вибір методів дослідження, проведення аналітичних та комп'ютерних розрахунків, розробка чисельних алгоритмів та написання статей. У роботі [25] - розробка моделі і постановка задач, формулювання систем рівнянь, проведення аналітичних і чисельних розрахунків та написання препринта. У роботі [26] дисертантові належить постановка задачі, участь у проведенні аналітичних розрахунків та написанні доповіді (комп'ютерні розрахунки виконані співробітниками Інституту прикладної математики імені М. В. Келдиша АН Росії).

Апробація результатів дисертації. Результати, які представлені у дисертації, доповідалися дисертантом на наступних наукових конференціях:

- 11-та Міжнародна Конференція-Школа з Фізики Плазми і Керованого Термоядерного Синтезу, Вересень 2006, Алушта, Україна.
- 8th Brazilian Meeting on Plasma Physics, November 2005, Rio de Janeiro, Brazil.
- 12th Int. Congress on Plasma Physics, October 2004, Nice, France.
- 1st LNCC Meeting on Computational Modelling, August 2004, Petrópolis, Brazil.
- X Latin American Workshop on Plasma Physics & 7^o Encontro Brasileiro de Física dos Plasmas, December 2003, São Pedro, Brazil.
- 2nd IAEA Techn. Committee Meeting on Spherical Tori & 7th Int. Spherical Torus Workshop, INPE, August 2001, São Jose dos Campos, Brazil.
- VII Workshop on Partial Differential Equation, July 2001, Rio de Janeiro, Brazil.
- 14th IAEA Techn. Committee Meeting on Research Using Small Fusion Devices, June 2001, São Paulo, Brazil.
- X Int. Congress on Plasma Physics & 42nd Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of APS, October 2000, Québec City, Canada.
- 26th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, June 1999, Maastricht, The Netherlands.
- 5^o Encontro Brasileiro de Física dos Plasmas & 7th Brazilian Plasma Astrophysics Workshop, December 1998, Águas de Lindóia, Brazil.
- IX International Congress on Plasma Physics & 25th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, July 1998, Prague, Republica Tcheca.
- 4^o Encontro Brasileiro de Física dos Plasmas & 6th Brazilian Plasma Astrophysics Workshop, September 1996, Águas de Lindóia, Brazil.
- Int. Workshop on Magnetospheric Plasmas, March 1996, Rio de Janeiro, Brazil.
- 3^o Encontro Brasileiro de Física dos Plasmas & 5th Brazilian Plasma Astrophysics Workshop, December 1995, Águas de Lindóia, Brazil.
- 1994 Int. Conference on Plasma Physics & VI Latin American Workshop on Plasma Physics, November 1994, Foz de Iguaçu, Brazil.
- Всесоюзное совещание по открытым ловушкам, Октябрь 1989, Москва, Россия

Матеріали дисертації доповідалися дисертантом на семінарах в Сухумському фізико-технічному інституті, в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна, в Університеті штату Ріо де Жанейро, в Бразильській національній лабораторії наукового програмування (Петрополіс, Бразилія).

Публікації. По темі дисертації автором надруковано більше 80 робіт, включаючи матеріали конференцій. Основні результати дисертаційної роботи представлені в 24 статтях, опублікованих у міжнародних наукових журналах, у яких анонімне рецензування є обов'язковою процедурою і які задовольняють вимогам ВАК. Список основних наукових праць (26 найменувань) наведено в кінці автореферату.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Основний текст дисертації складається із вступу, п'яти розділів основного тексту з 61 рисунками, висновків, списку використаних літературних джерел з 235 найменувань. Повний обсяг дисертації становить 313 сторінок, список використаних літературних джерел міститься на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладено вихідні дані і обґрунтовано актуальність теми дисертації, пояснено необхідність проведення роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, розкрито практичне значення та зв'язок робіт з науковими програмами і темами, подано відомості про апробацію результатів дисертації. Вступ містить стислий огляд літератури за темою дисертації та окреслює коло питань, що висвітлюється в роботі, обґрунтовується вибір теми досліджень, структура та основний зміст роботи.

У **першому розділі**, використовуючи циліндричні координати у геометричному просторі (ρ, θ, z) і просторі швидкостей, наведено рівняння Власова для збурених функцій розподілу заряджених частинок сорту α у формі, зручній для опису лінійного відклику 1D- і 2D-неоднорідної аксіально-симетричної плазми на електромагнітні збурення малої амплітуди, **підрозділ 1.1**. Векторні величини розкладені на нормальну A_1 , бінормальну A_2 і паралельну A_3 проєкції відносно до рівноважного магнітного поля $\mathbf{H}_0(\mathbf{r})$:
де . Як приклад 1D осесиметричних систем розглянуті моделі рівноважної циліндричної плазми без зіткнень з одним або кількома сортами іонів у прямому [], **підрозділ 1.2**, та гвинтовому [], **підрозділ 1.3**, магнітних полях з урахуванням дрейфових поправок у максвелівській функції розподілу іонів і електронів: , де

У моделі з гвинтовим полем вважається, що рівноважний струм тече вздовж \mathbf{H}_0 , формується електронами, швидкість яких (при), і генерує поперізне магнітне поле . При цьому силові лінії поля навиваються на магнітні поверхні, котрі мають форму концентричних циліндрів колового перерізу, , довжиною . У загальному випадку така модель дозволяє розглянути струмонесучу плазму з широм () та радіальною неоднорідністю рівноважних параметрів: , і . Коли , то і маємо плазму у гвинтовому магнітному полі без ширину (). Якщо , то і маємо модель 1D циліндричної плазми у прямому магнітному полі.

Отримані вирази для ω , при $\omega \approx \omega_{UH}$, відповідають результатам роботи [Ross D.W., Chen G.L., Mahajan S.M., *Phys. Fluids*, -1982, -V.25, -p. 652] при $\omega \approx \omega_{UH}$. Дослідження дисипації хвиль при $\omega \approx \omega_{UH}$ показало, що умови іонно-циклотронного резонансу (ІЦР) у плазмі зі струмом в гвинтовому

магнітному полі: $\omega \approx \omega_{UH}$, істотно відрізняються від умов у прямому магнітному полі: $\omega \approx \omega_{UH}$. У **підрозділі 1.2**

продемонстрована спроможність сепарації ізотопів (або іонів різної маси) в однорідній плазмі у прямому магнітному полі за допомогою біжучих циліндричних ВЧ хвиль у частотному діапазоні ІЦР. У **підрозділі 1.3** на моделі неоднорідної плазми у гвинтовому полі проаналізовані умови генерації струмів захоплення біжучими хвилями альфвенівського діапазону.

У **другому розділі** проаналізовані умови збудження об'ємних коливань і ВЧ нагрівання в газодинамічній пастці відкритого типу на основі діелектричного тензора холодної плазми; а на основі кінетичної теорії досліджено вплив баунс-резонансів на поглинання ВЧ полів у 2D плазмовому пробкотроні, Рис.1.

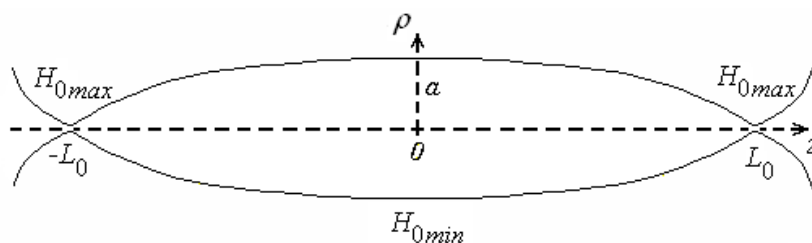


Рис.1. Двовимірно-неоднорідний плазмовий пробкотрон з магнітними дзеркалами на торцях при $\omega \approx \omega_{UH}$.

В наближенні геометричної оптики (**підрозділ 2.1**) для поперечних компонент **E**-поля,

де ω - частота хвилі, ω_{UH} - верхня гібридна частота, отримано дисперсійне співвідношення ША і ШМЗ хвиль в однорідній циліндричній плазмі у неоднорідному магнітному полі $H_0(z)$ з великим пробковим відношенням $L_0/a \gg 1$ в умовах, коли $\omega \approx \omega_{UH}$, де L_0 - напівдовжина пробкотрона, a - радіус плазми при $\omega \approx \omega_{UH}$:

Тут

а ζ_i є i -ий корінь функції Бесселя, так що $J_n(\zeta_i) = 0$. Розподіл поздовжніх хвильових чисел вздовж системи, k_z , для ША і ШМЗ хвиль у водневій плазмі з домішкою дейтерію в пробкотроні КП-2М (Сухумський Фізико-Технічний Інститут): $R_m = 20$ см, $G = 0.7$ кГс, $N_{OD} = 0$, $N_{OH} = 10^{14}$ см $^{-3}$ і $N_{OH} = 4 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$, зображена графічно на Рис.2.

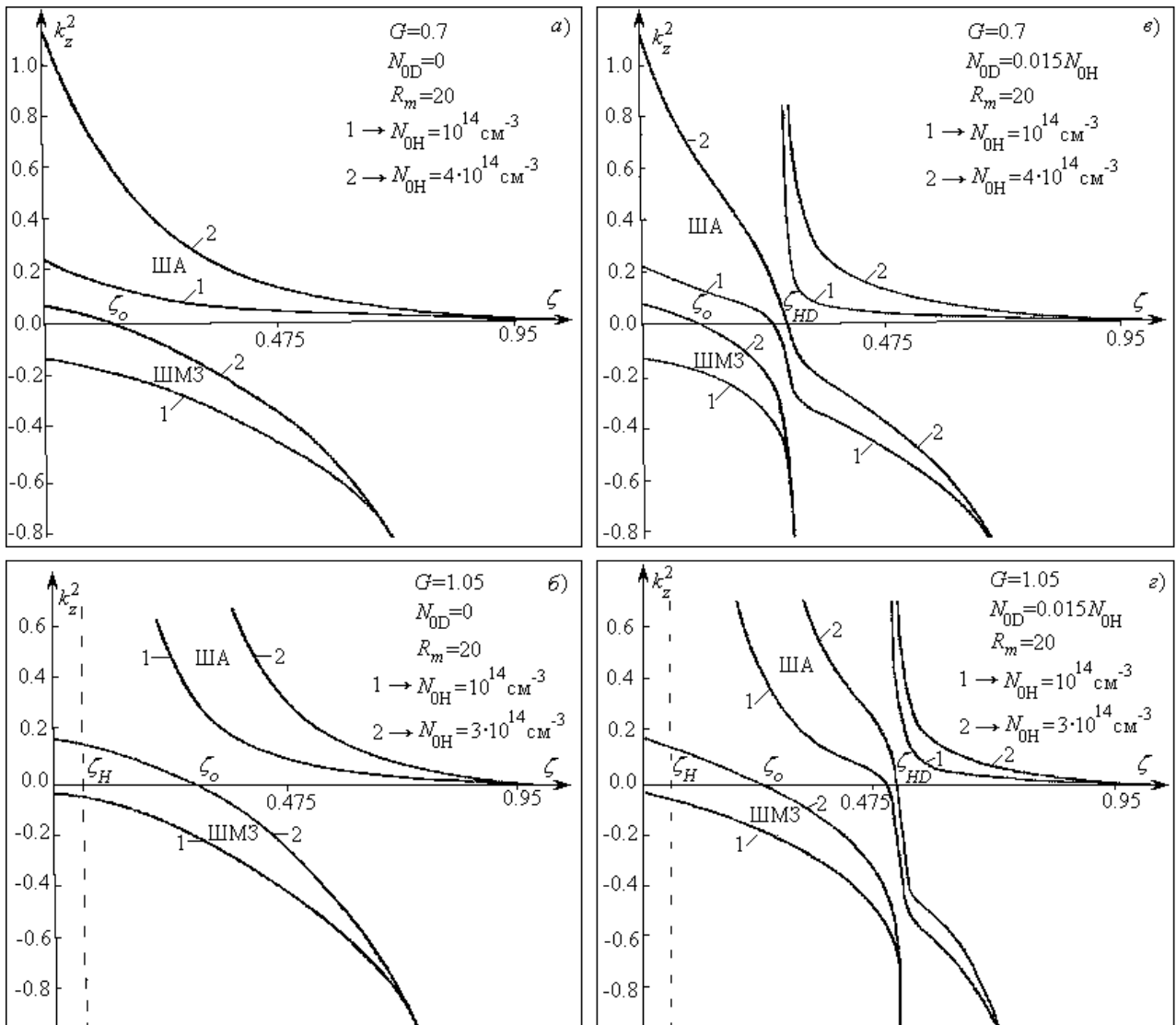


Рис. 2. Розподіл k_z^2 вздовж системи для швидких хвиль у плазмовому пробкотроні.

Віддалення від центру пастки, де виникає відсікання зони поширення

ШМЗ хвиль, , відзначається через параметр гіротропності плазми і густину плазми в . Звідси виникає ситуація, коли при

густині протонів у плазмі нема зони прозорості для ШМЗ хвиль; якщо , то область існування ШМЗ хвиль обмежується інтервалом від до , де . Знаючи , можна визначити умови

резонансного збудження хвиль: для ША хвиль, і для ШМЗ хвиль, де n – цілі числа. У діапазоні частот в плазмі виникає зона ЦР при , де . Присутність малої домішки дейтерію практично не впливає на умови збудження ШМЗ хвиль при

. Але поблизу зони іон-іонного гібридного резонансу, особливості мають ША хвилі, для яких спостерігається розщеплення гілки коливань і стають можливими трансформаційні ефекти. Якщо , то поблизу ВЧ поля представляють собою суперпозицію ША і ШМЗ хвиль; при цьому можливі ефекти трансформації за участю ШМЗ коливань.

Крім дисипації власних об'ємних коливань, ВЧ нагрівання обмеженої по радіусу плазми може бути забезпечено через збудження поверхневих хвиль, які

при мають дисперсію , підрозділ 2.2.

Результати розрахунків структури ВЧ полів і поглинутої потужності при ЦР нагріванні через штучно-модельну дисипацію хвиль в плазмі КП-2М за допомогою 2D коду FITA показані на Рис.3.

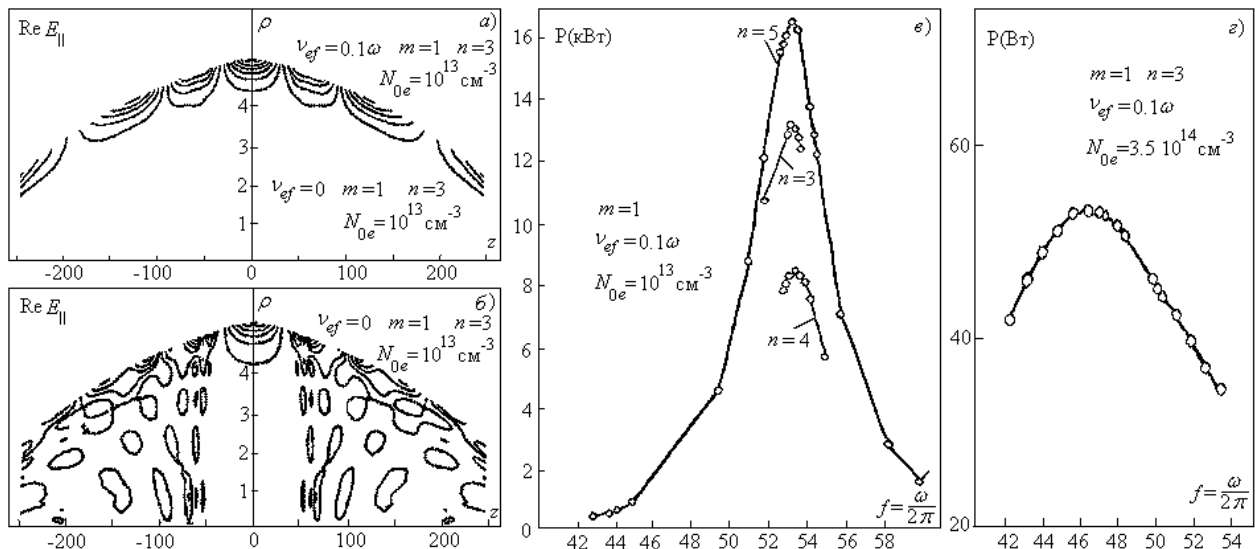


Рис.3. Ізолінії паралельної компоненти електричного поля (а, б) і залежність поглинутої потужності, Р, від частоти ВЧ генератора при ПЦР нагріванні плазми в пробкотроні на поверхневій (ε) і ШМЗ (ε) хвилях.

Для оцінки поглинутої ВЧ потужності у рівноважній плазмі без зіткнень, у **підрозділі 2.3**, отримані і проаналізовані елементи компонент тензору на основі рішення рівнянь Власова для збурення функції розподілу запертих

частинок будь якого сорту у

пробкотроні з 2D магнітним полем :

. Для опису баунс-періодичного руху запертих частинок вздовж введені змінні замість :

, що дозволяє отримати внесок частинок даного сорту у поздовжню, нормальну та бінормальну компоненти густини струму за формулами:

де , а індекси відповідають частинкам з позитивним або негативним напрямком паралельної швидкості відносно до : . Гармоніки з номерами , що необхідні для розрахунку компонентів густини струму, знайдені в нульовому наближенні по параметру замагніченості, . Для отримання елементів п'яти основних (діагональних і двох гіротропних) компонент діелектричного тензору використані Фур'є-розклади густини струму і

електричного поля: , де

Фур'є-гармоніки зв'язані через елементи поперечної і поздовжньої діелектричної проникності, як

Отримані елементи і мають резонансні знаменники, якими визначаються умови резонансної взаємодії хвиль із запертими частинками:

, де є номери баунс-резонансів, параметр запертості співпадає з параметром повних еліптичних інтегралів

першого та другого родів, а ω - баунс-частота частинок з заданими ω і v . Резонансні частинки з такими баунс-частотами відповідають за поглинання енергії хвиль у рівноважній плазмі. Рухаючись вздовж силової лінії утримуючого магнітного поля, вони втягуються у періодичний рух між точками повороту, багатократно взаємодіють з хвилею в зонах циклотронного резонансу, які розміщені симетрично відносно площини $\theta = 0$. Важливою особливістю 2D пробкотронної плазми є те, що весь спектр E -поля (через ω) дає внесок у задану n -гармоніку густини струму. Внеском пролітних частинок у ω і $\omega \pm n\omega_c$ можна знехтувати оскільки вони втрачаються в позапробкових зонах за час одного прольоту магнітної пастки.

В третьому розділі дисертації для моделей аксіально-симетричних токамаків з коловим (підрозділ 3.1, Рис.4а), еліптичним (підрозділ 3.2, Рис.4б) і D-подібним (підрозділ 3.3, Рис.4в) перерізом магнітних поверхонь розв'язані кінетичні рівняння для функцій розподілу пролітних та запертих частинок, нехтуючи дрейфовими ефектами і шириною бананових траєкторій. Розглянуті моделі токамаків з великим та малим аспектним відношенням, з концентричними поверхнями та з рівновагою за Соловйовим (підрозділ 3.4, Рис.4г).

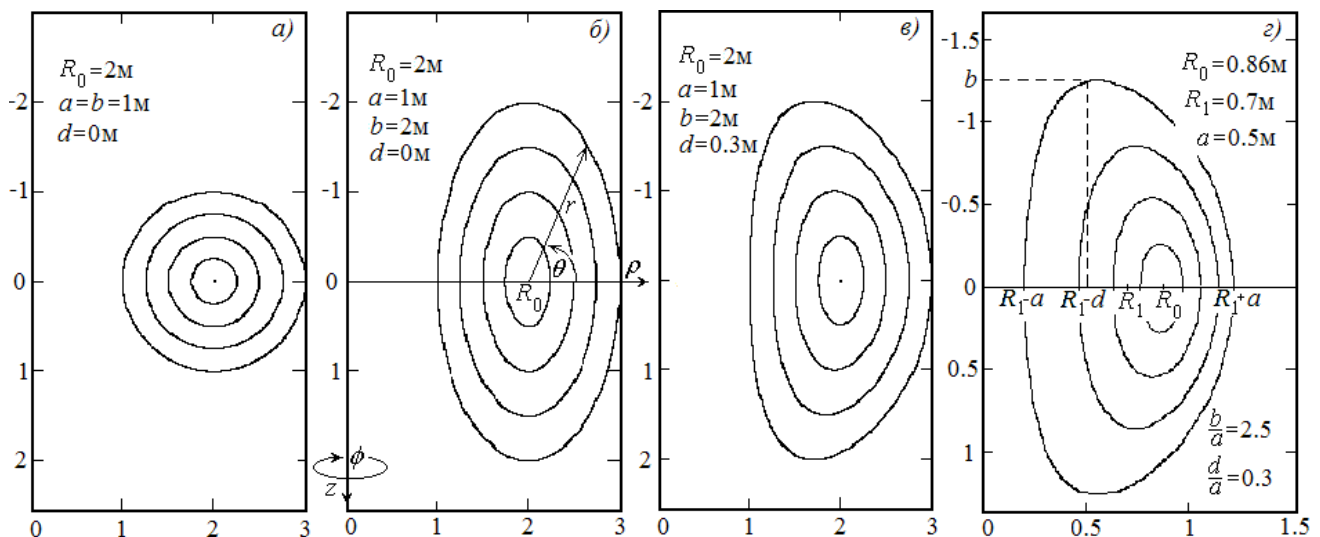


Рис. 4. Осесиметричні токамаки з коловим (а), еліптичним (б), D-подібним (в) перерізом концентричних магнітних поверхонь і з рівновагою за Соловйовим (г).

У загальному випадку для опису осесиметричних D-подібних токамаків використані квазітороїдні координати (r, θ, ϕ) , які зв'язані з циліндричними (ρ, φ, z)

як $r = \rho \sqrt{1 - \frac{z^2}{a^2}}$, $\theta = \phi - \frac{z}{a} \tan^{-1} \frac{z}{a \sqrt{1 - \frac{z^2}{a^2}}}$, де a і R_0 - малий і великий радіуси токамаку, b/a характеризує еліптичність поперечного перерізу магнітних поверхонь, а d/a - параметр їх трикутності. При цьому циліндричні проекції \mathbf{H}_0 задаються як $H_{\rho} = -\frac{z}{a} \frac{r}{\rho}$, $H_{\phi} = \frac{z}{a} \frac{r}{\rho}$, $H_z = 1 - \frac{z^2}{a^2}$.

де , так що ,

Якщо , маємо перехід до моделі еліптичного токамака; при маємо перехід до моделі токамаків з коловим перерізом магнітних поверхонь; при моделі сферичних токамаків переходять у токамаки з великим аспектним відношенням.

Для розв'язку кінетичних рівнянь збурена функція розподілу заряджених

частинок знаходиться у вигляді , де змінні v і μ (енергія частинок та їх магнітний момент) вводяться замість

поздовжньої і поперечної швидкостей, , так

що . Істотною особливістю витягнутих токамаків є можливість існування додаткових груп запертих частинок на таких магнітних поверхнях, де модуль поля H_0 має два (або більше) локальних мінімуми в залежності від пологісного кута θ . В еліптичному токамаку критерій існування двічі запертих (d -запертих) частинок визначається формулою:

що зв'язує еліптичність , обернене аспектне відношення та запас стійкості

токамаку на заданій магнітній поверхні.

Наприклад, для 2D токамаків з коловим перерізом магнітних поверхонь (

,), найбільш простий вигляд внеску пролітних (u) і запертих (t)

частинок в елементи поперечної (,) і поздовжньої (,)

діелектричної проникності отримується у системі координат з „прямими” силовими лініями утримуючого магнітного поля:

,

,

,

.

Тут

Умови резонансної взаємодії хвиля-частинка у тороїдній плазмі визначаються рівністю нулю знаменників в і : 1) - для пролітних частинок; 2) - для частинок запертих, де - безрозмірний модуль швидкості. При цьому, як завжди, маємо умови черенковського резонансу (), нормального іонно-циклотронного резонансу (), нормального електронно-циклотронного резонансу (), як для пролітних, так і для запертих частинок. Крім того, аналізуючи резонансну взаємодію хвиля-частинка в тороїдній геометрії, необхідно враховувати і фазові коефіцієнти , та , в умовах черенковського та циклотронного

резонансів, відповідно. Наведені умови резонансів записані для частинок неозначеного сорту. Відповідні резонансні умови для електронів та іонів плазми отримуються через заміну безіменних маси M та заряду e на m та e .

Одним із основних механізмів ВЧ нагрівання тороїдної плазми є безіткненне поглинання хвиль на пролітних та запертих електронах (поглинання Ландау) в умовах, коли паралельна компонента електричного поля взаємодіє з частинками завдяки черенковському резонансу [Каладзе Т.Д., Пятак А.И., Степанов К.Н., *Фізика Плазми*, -1982, -Т. 8, -С. 823]. Особливості черенковського резонансу в тороїдній геометрії обумовлені тим, що: а) резонансні умови

для пролітних і $\omega = kv$ для запертих електронів істотно різні; б) весь спектр полоїдних гармонік $\omega = m\Omega_e$ дає внесок в m -у гармоніку $\omega = kv$. В результаті, для оцінки ВЧ потужності, що поглинається у плазмі через механізм Ландау,

, маємо формулу:

де

Таким чином, при заданих ω , n , m , r і амплітудах E -поля, поглинання на пролітних і запертих електронах визначається їх різним внеском в уявну частину поздовжньої проникності: $\epsilon'' = \epsilon''_{\text{Landau}} + \epsilon''_{\text{Cherenkov}}$. У випадку збудження в плазмі ТАЕ мод [Cheng C.Z., Chance M.S., *Phys. Fluids*, -1986, -V.29, -p. 3695] з двома суміжними гармоніками ($\omega = kv$) число доданків в ϵ'' істотно зменшується:

де E_{\parallel} є квадрат модулю електричного поля.

Іншим механізмом ВЧ нагрівання плазми є безіткненна дисипація хвиль в області частот іонно-циклотронного та електронно-циклотронного резонансів, коли частинки ефективно взаємодіють з поперечними компонентами електричного поля [Лонгинов А.В., Степанов К.Н., *Высокочастотный нагрев плазмы*, ИПФ АН СССР, Горький, 1983]. При нагріванні плазми на основній (першій) циклотронній гармоніці для поглинутої ВЧ потужності,

, маємо формулу

Внесок пролітних і запертих частинок в уявну частину елементів поперечної проникності, $\text{Im} \varepsilon_{\parallel}$, визначається добре відомим методом лишків і правилом Ландау при обході полюсів резонансних знаменників.

Результати розрахунків діагональних () елементів ε_{\parallel} та їх порівняння з локальним циліндричним (1D) наближенням,

для мод з $m=1$ і $n=0$ в плазмі з параметрами: $a=10$ см, $R=100$ см, $T=10$ еВ, $n=10^{20}$ см⁻³, $\omega = 2.5$ МГц, представлені на Рис. 5 в залежності від радіусу і частоти ВЧ генератора. Через порівняння $\text{Im} \varepsilon_{\parallel}$, можна побачити, що черенковське поглинання хвиль з великою фазовою швидкістю, відбувається через їх баунс-резонансну взаємодію з пролітними електронами.

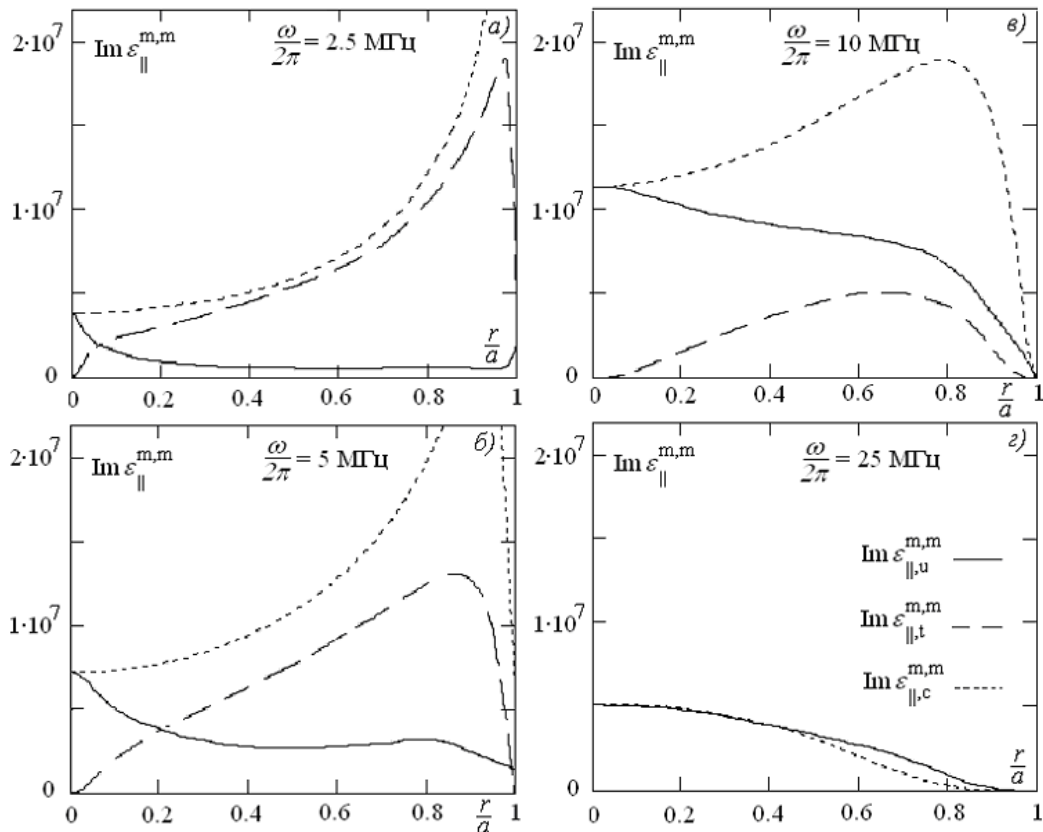


Рис. 5. Внесок пролітних і запертих частинок в елементи поздовжньої проникності токамака з коловим перерізом магнітних поверхонь в залежності від радіусу плазми при а) 2.5 МГц, б) 5 МГц, в) 10 МГц, г) 25 МГц.

Як і у випадку циліндричної плазми, максимальне поглинання на пролітних частинках мають хвилі з $\omega > \omega_{UH}$. Іншою особливістю взаємодії хвиля-частинка у тороїдній плазмі є те, що роль запертих частинок стає істотною для повільних хвиль з $v_{ph} \ll v_{Te}$, коли їх частота ω зрівнюється з баунс-частотою t -запертих

електронів , тобто при

Більш того, повільні (зазвичай низькочастотні) хвилі ефективно взаємодіють з запертими електронами на зовнішніх магнітних поверхнях, де їх популяція зростає як . Цей параметр наближається до одиниці в сферичних токамаках ($\epsilon \sim 1$), і завжди малий в токамаках з великим аспектним відношенням ($\epsilon \ll 1$). Зокрема, ефективне нагрівання запертих електронів можливе в токамаках в умовах альфвенівського нагрівання, коли зона альфвенівського резонансу () знаходиться біля плазмової межі. Отримані залежності застосовані також для аналізу нагрівання плазми швидкими хвилями з , які мають ефективно взаємодіяти лише з пролітними електронами. Це означає, що при нагріванні плазми такими хвилями можна створити хороші умови для трансформації поздовжнього імпульсу хвилі в поздовжній рух пролітних електронів, що має забезпечувати генерацію квазі-стаціонарного струму захоплення [Колесниченко Я.И., Параил В.В., Переверзев Г.В., «Вопросы теории плазмы», М., Энергоатомиздат, вып. 17, 1989, с. 3-156].

Слід відзначити, що уявна частина поздовжньої проникності, як в тороїдній, так і в циліндричній плазмах, для хвиль з є експоненціально малою величиною. Однак, цікавою особливістю є те, що дисипація цих хвиль у токамаку на пролітних електронах при може бути сильніша (у кілька разів), Рис.5г, ніж у циліндричному наближенні. Через графіки на Рис.5 можна визначити магнітні поверхні, де слід чекати ефективного нагрівання пролітних або запертих частинок в осесиметричному токамаку. Зокрема, внесок запертих електронів в є головним лиш для низькочастотних хвиль (Рис.5а для МГц, що відповідає альфвенівським хвилям) і зменшується з ростом частоти (Рис.5в і Рис.5г для МГц і МГц, що відповідають діапазону ШМЗ і нижне-гібридних хвиль). Як можна побачити з Рис.5б, хвилі з МГц і заданими m і n ефективно взаємодіють з пролітними електронами поблизу магнітної осі та біля плазмової поверхні. На поверхнях середніх радіусів ці хвилі поглинаються в основному запертими електронами. Аналогічні результати отримані для токамаків з D-подібним, еліптичним і коловим перерізом магнітних поверхонь з великим і малим аспектним відношенням і іншими параметрами плазми і магнітного поля, включаючи токамаки з рівновагою за Соловйовим, де розраховано шафранівський зсув магнітних поверхонь.

Розрахунок недиагональних елементів і проведено при аналізі поглинання ТАЕ мод з хвилевими числами , , та частотою кГц у плазмі токамаку JET: см, , , Т, , ,

. При заданих параметрах хвилі і плазми, радіуси раціональних поверхонь, де $\omega = \omega_{pe}$ і $\omega = \omega_{pe} \pm \omega_{ce}$, рівні $r_{\pm} = \frac{c}{\omega_{pe} \pm \omega_{ce}}$ і $r_{\pm} = \frac{c}{\omega_{pe} \pm \omega_{ce}}$ для мод m і n , відповідно. Радіус же резонансної поверхні, де паралельні компоненти хвильового вектору зрівнюються, $r_{\pm} = \frac{c}{\omega_{pe} \pm \omega_{ce}}$, є $r_{\pm} = \frac{c}{\omega_{pe} \pm \omega_{ce}}$, де частота альфвенівських хвиль є $\omega_{ce} = \frac{c}{r}$ кГц, так що $\omega_{ce} = \frac{c}{r}$. Поблизу інтервал існування ГАЕ мод визначається як $\omega_{pe} \pm \omega_{ce}$, що відповідає діапазону $\omega_{pe} \pm \omega_{ce}$ кГц.

Графіки внесків пролітних та запертих електронів в ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} в залежності від радіусу плазми представлені на Рис.6. Порівнюючи ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} видно що ϵ_{\parallel} практично в усьому об'ємі плазми виключаючи зони раціональних магнітних поверхонь, ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} , де аргументи дисперсійної функції для пролітних електронів мають великі значення. Завдяки цьому ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} стають значно меншими, ніж внесок запертих частинок в ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} . Інші особливості радіальної структури діагональних елементів поздовжньої проникності спостерігаються поблизу резонансної поверхні $\omega = \omega_{pe}$, де ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} . Структура недіагональних елементів поздовжньої проникності, представлена на Рис.6в. Порівнюючи результати Рис.6а і Рис.6б поблизу $\omega = \omega_{pe}$ бачимо що ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} і ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} . Більш того, відповідно Рис.6в, ϵ_{\parallel} змінює знак у цієї поверхні: $\epsilon_{\parallel} > 0$ при $\omega < \omega_{pe}$; і $\epsilon_{\parallel} < 0$ при $\omega > \omega_{pe}$. Уявні частини діагональних елементів ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} , як і ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} , позитивні при будь-яких радіусах незалежно від знаків мод m і n . Цю особливість слід враховувати при дослідженні механізмів стабілізації і збудження низькочастотних хвиль альфвенівського типу в тороїдній плазмі.

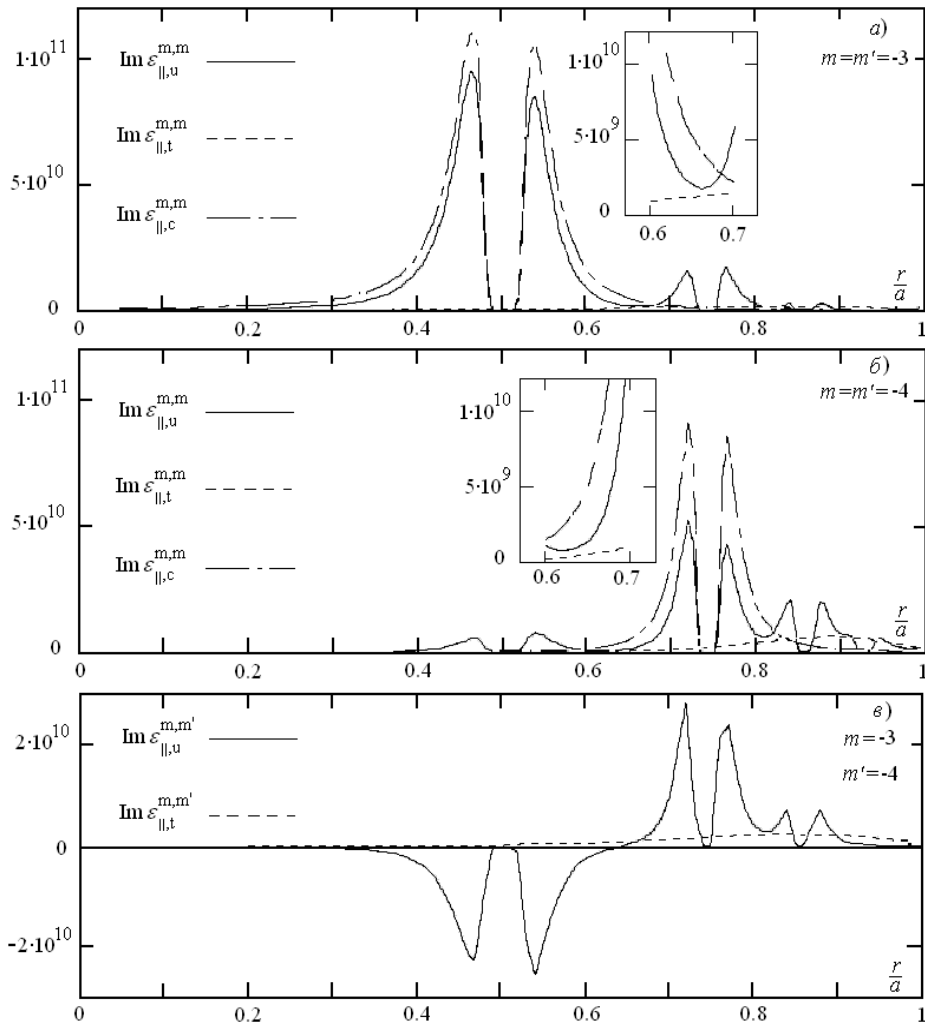


Рис. 6. Внесок пролітних і запертих електронів в уявну частину елементів позовжньої діелектричної проникності в діапазоні частот ТАЕ мод з номерами $n = 2$ і а) , б) , в) , .

У четвертому розділі вивчені діелектричні властивості рівноважної магнітосферної плазми у полі точкового і лабораторного магнітного диполя та у магнітному полі з коловими силовими лініями, Рис.7. У магнітосфері Землі досліджена беззіткненна дисипація хвиль на основі розв'язку рівняння Власова для збурення функції розподілу запертих частинок (підрозділи 4.1-4.3). Щодо лабораторної магнітосферної плазми (підрозділ 4.4), то поглинання хвиль досліджене як на пролітних, так і на запертих частинках, при розрахунку скінченного радіусу a азимутального струму I , що генерує дипольне магнітне поле \mathbf{H}_0 з циліндричними проекціями:

де використані квазітороїдні координати $\rho = a + r \cos\theta$, $z = -r \sin\theta$, $\varphi = \varphi$.

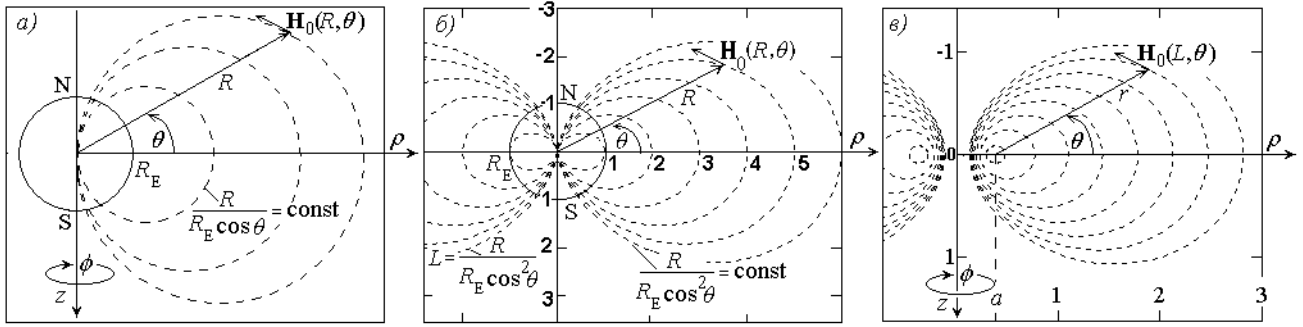


Рис. 7. Магнітосферна плазма у магнітному полі з коловими силовими лініями (а); у полі точкового (б) і лабораторного (в) магнітного диполя.

Функція розподілу частинок в лабораторній магнітосфері знаходиться як

де , , ,
а для гармонік маємо рівняння:

Тут , , ,

Оскільки лабораторна магнітосфера являє собою 2D конфігурацію з замкненими силовими лініями і одним мінімумом рівноважного магнітного поля, то плазмові частинки мають ділитися на дві групи, так званих, запертих (t) і пролітних (u) частинок. У фазовому об'ємі така сепарація здійснюється через параметр μ . Аналізуючи умови, коли : а) , для пролітних частинок; б) , для запертих частинок , де кутами визначаються точки їх зупинки (віддзеркалення).

При цьому 2D поперечні і поздовжня компоненти густини збуреного струму частинок довільного сорту визначаються через інтегральні вирази:

Для опису баунс-періодичного руху запертих і пролітних частинок вздовж силової лінії \mathbf{H}_0 , зручно використовувати нову часоподібну змінну τ замість θ ,

Отримані вирази елементів діелектричної проникності необхідні для розв'язку 2D хвильових рівнянь і аналізу дисперсійних характеристик власних коливань магнітосферної плазми у діапазоні частот альфвенівського і ЩР резонансів. Наприклад, в наближенні геометричної оптики, коли

, дисперсійне рівняння кінетичних альфвенівських (КА) хвиль має вигляд:

де i і j відповідають перпендикулярній і паралельній компонентам хвильового вектора, а поперечна і поздовжня компоненти діелектричного тензора у плазмі з холодними іонами та гарячими електронами визначаються формулами ϵ_{\perp} і ϵ_{\parallel} . При малих ларморівських радіусах частинок, коефіцієнт поглинання κ КА хвиль з фазовою швидкістю рівною альфвенівській, v_A EMBED Equation.3

, поблизу L -силової лінії магнітного поля може бути оцінений по формулі

де

Результати розрахунків впливу пролітних і запертих електронів в ϵ_{\parallel} і

в залежності від частоти коливань з номером моди $m=2$ при $L=2$ в лабораторній магнітосферній плазмі з параметрами пастки LDX [Garnier D.T., Mauel M., Kesner J., *41st Annual Meeting of the DPP of the APS*, Seattle, November 1999]: $a=0.35$ м, $T_0(L)=200/L^{8/3}$ еВ, $N_0(L)=\dots / L^4$ м⁻³, представлені на Рис.8. Порівняння

і демонструє, що низькочастотні хвилі поглинаються головним чином завдяки їх резонансній взаємодії з запертими електронами, а максимум дисипації асоціюється з максимумом і досягається, коли частота хвилі

стає порівняною з баунс-частотою запертих електронів, . У цьому випадку, члени з низькими номерами баунс-резонансів ($p=1, p=2$) дають основний внесок в . Як і в плазмі токамаку, найбільш ефективна взаємодія хвилі з запертими електронами має місце, коли номери основних баунс-резонансів порівняні з номерами полюдних гармонік, .

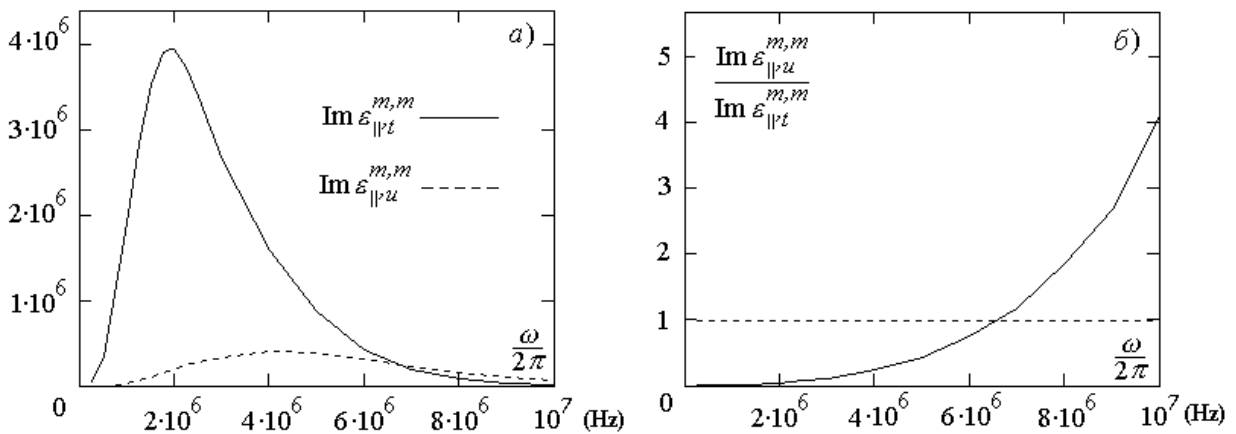


Рис.8. Внесок запертих і пролітних електронів в уявну частину елементів позовжньої проникності лабораторної магнітосфери в залежності від частоти хвилі.

Згідно графікам на Рис.8, поглинання хвиль на пролітних частинках в лабораторній магнітосфері завжди мале через їх нечисленність у плазмовому об'ємі і має бути малим на зовнішніх магнітних поверхнях, де число пролітних частинок різко зменшується, тому що з ростом L . При цьому максимум досягається (за аналогією з запертими частинками) в умовах, коли

і фазова швидкість хвилі, , зрівнюється з тепловою швидкістю електронів, . Слід відзначити, що і приймають експоненціальне малі значення для швидких хвиль з і . Однак, при цьому черенковське поглинання хвиль пролітними електронами у діапазоні частот може в кілька разів перевищувати поглинання на запертих електронах. Відносна величина / в лабораторній магнітосфері в залежності від ω зображена на Рис.8б.

У п'ятому розділі отримані дисперсійні співвідношення для циклотронних хвиль, що поширюються вздовж геомагнітного поля в 2D магнітосферних плазмах з анізотропною температурою (). Розглянуті дві моделі

геомагнітного поля: а) з силовими лініями поля «точкового» магнітного диполя, де модуль дипольного магнітного поля є $B_0 \frac{R_E^3}{R^3} \cos^2 \theta$, **підрозділи 5.2 і 5.3**, і б) з коловими силовими лініями, де модуль магнітного поля є $B_0 \frac{R_E^3}{R^3} \sin^2 \theta$, **підрозділ 5.4**.

Тут R_E - радіус Землі, R - геоцентричне віддалення до точки на магнітній силовій лінії, що розглядається (відраховується від центру Землі), θ - географічна широта (відраховується від екваторіальної площини), B_0 - значення геомагнітного поля на екваторі, тобто при $R = R_E$ і $\theta = 0$. У якості стаціонарних (але нерівноважних) функцій розподілу високоенергійних частинок використані бімаксвелівська $f_{\text{bi-Maxwell}}$ та білоренцівська $f_{\text{bi-Lorentz}}$ функції.

частинки використані бімаксвелівська $f_{\text{bi-Maxwell}}$ та білоренцівська $f_{\text{bi-Lorentz}}$ функції.

де $f_{\text{bi-Maxwell}}$ та $f_{\text{bi-Lorentz}}$ - бімаксвелівська (підрозділи 5.2 і 5.4) та білоренцівська (підрозділ 5.3) функції.

якщо $\gamma > 1$; де Γ - Гамма функція, L -змінна (екваторіальне віддалення до L -шару магнітних силових ліній), яка вводиться замість сферичної змінної R , як $R = L R_E$ для дипольної магнітосфери з коловими силовими лініями і $R = L R_E \sin \theta$ для дипольної магнітосфери. Числовий код розроблено для аналізу дисперсійних характеристик електромагнітних іонно-циклотронних (ЕМІС, *ElectroMagnetic Ion-Cyclotron*) хвиль у водневій плазмі з силовими лініями магнітного поля у формі кола та бімаксвелівським розподілом енергійних протонів, **підрозділ 5.5**. Показано, що як і у випадку прямого поля, інкремент зростання протонно-циклотронної нестійкості (РСІ, *Proton-Cyclotron Instability*) в 2D магнітосфері визначається внеском енергійних іонів в уявну частину поперечної діелектричної проникності. Внесок запертих частинок в компоненти діелектричного тензора планетарної магнітосфери отримується за аналогією з лабораторною магнітосферною плазмою. Наприклад, елементи поперечної проникності магнітосферної плазми з коловими силовими лініями мають вирази:

де

,

,

,

,

,

.

Саме ці діелектричні характеристики входять в дисперсійне співвідношення для ліво- і право-поляризованих хвиль, що поширюються вздовж 2D геомагнітному поля (тобто при $m=0$, , ,):

де індексом σ позначено сорт заряджених частинок (електрони, протони, важки іони). Це рівняння записано в узагальненій формі і є зручним для аналізу дисперсійних характеристик як право-поляризованих (електронно-циклотронних) хвиль при $l=-1$, так і ліво-поляризованих (іонно-циклотронних) хвиль при $l=1$.

Тут паралельна компонента хвильового вектора для магнітосфери з коловими силовими лініями зв'язана з власними хвильовими числами n як , а відповідає паралельному показнику заломлення хвиль.

Стосовно до ЕМІС хвиль ($l=1$) у водневій плазмі, реальна частина їх частоти і хвильові числа зв'язані таким чином

,

де ω_p є квадрат ленгмюрівської частоти протонів, що розраховано через сумарну густину холодних (N_{0c}) і гарячих (резонансних) (N_{0h}) протонів,

тобто при $\omega > \omega_{ce}$, а ω_{ce} - мінімальна циклотронна частота протонів на L -силовій лінії геомагнітного поля. Так що для n -мод ЕМІС хвиль маємо формулу

Другою важливою характеристикою ЕМІС хвиль є уявна частина частоти γ , яка характеризує або інкремент зростання хвиль при $\omega < \omega_{ce}$, або декремент їх поглинання при $\omega > \omega_{ce}$. Для водневої плазми у прямому магнітному полі, інкремент (декремент) ЕМІС хвиль γ_s при визначається виразом [Xue S., Thorne R.M., Summers D., *J. Geophys. Res.*,-1996,-V. 101,-P.15,467]:

де

Як добре відомо, збудження ЕМІС хвиль ($\omega < \omega_{ce}$) можливо лише при наявності в плазмі групи енергійних протонів з $\omega > \omega_{ce}$. Для інкременту ЕМІС хвиль в 2D магнітосфері з коловими силовими лініями маємо аналогічні вирази:

де

Дисперсійні характеристики ЕМІС хвиль в зоні геостаціонарних орбіт при $L=6.6$, де плазма містить холодні електрони густиною $N_{0e}=11 \text{ см}^{-3}$, холодні протони густиною $N_{0c}=10 \text{ см}^{-3}$ і високотемпературні протони густиною $N_{0h}=1 \text{ см}^{-3}$ з паралельною і поперечною температурами $T_{\parallel}=10 \text{ кеВ}$ і $T_{\perp}=1 \text{ кеВ}$, відповідно. Результати розрахунків власних хвильових чисел та інкрементів зростання ЕМІС хвиль в залежності від частоти у 1D і 2D моделях плазми представлені на Рис.9. Показано, що протонно-циклотронна нестійкість ЕМІС хвиль можлива в обох моделях плазми у діапазоні нижче мінімальної іонно-циклотронної частоти, $\omega < \omega_{ci}$. Графіки $\gamma_s(\omega)$ і $\gamma_c(\omega)$ подібні, але $\gamma_c(\omega) \ll \gamma_s(\omega)$ при однакових параметрах плазми і геомагнітного поля.

Значна відмінність інкрементів γ_s і γ_c породжена тим, що взаємодія хвиля-частинка в 1D замагніченій плазмі є більш ефективною у порівнянні з 2D магнітосферою через те, що у прямому магнітному полі резонансні частинки

рухаються з ω і весь час взаємодіють з хвилею відповідно резонансній умові: $\omega = n\Omega_{c0}$. Щодо 2D магнітосфери, де $\Omega_{c0} \ll \omega$, то маємо іншу умову циклотронного резонансу: $\omega = \Omega_{c0} + n\omega_{ce}$.

де параметр запертості K і магнітний момент μ співвідносяться як $K = \mu / \hbar$. Через це, заперта частинка, рухаючись між точками повороту, лише частину баунс-періоду може ефективно взаємодіяти з хвилею.

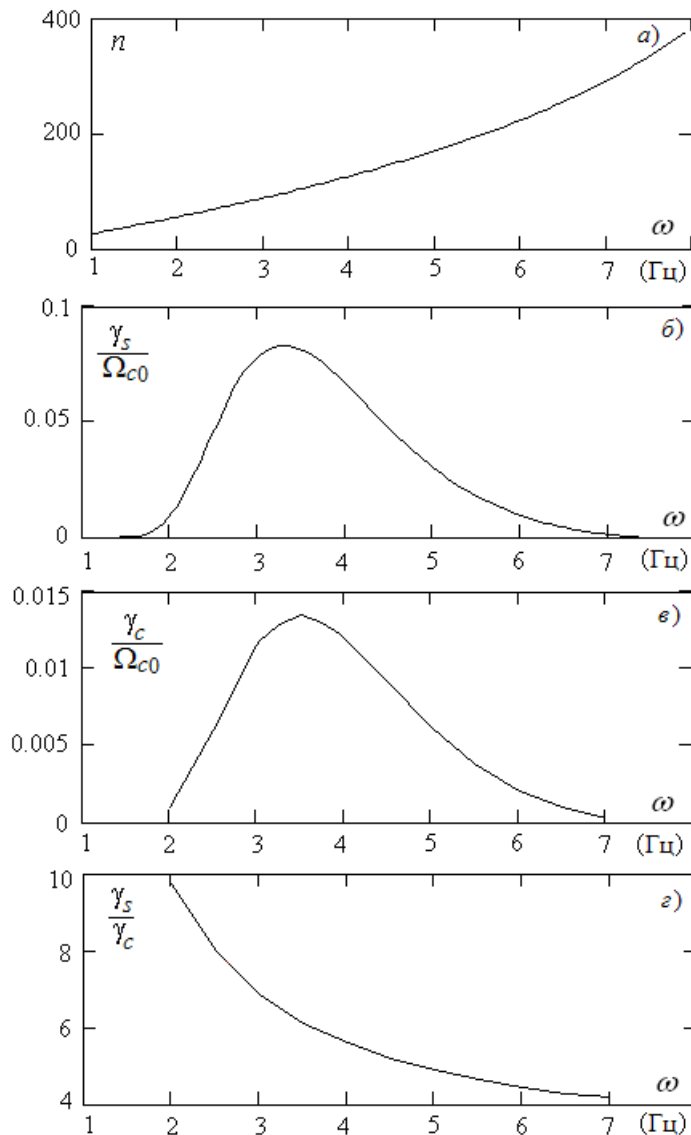


Рис.9. Залежність від частоти власних хвильових чисел іонно-циклотронних хвиль в водневій плазмі (а); інкрементів протонно-циклотронної нестійкості іонно-циклотронних хвиль, що поширюються вздовж прямого (б) і 2D магнітосферного магнітного поля (в); та їх відносна величина (г).

Аналогічний підхід може бути розвинуто і для досліджень дисперсійних характеристик ЕМІС хвиль в багатокомпонентній плазмі, яка може містити протони і важкі іони (наприклад, іони He^+ і O^+) з анізотропною температурою. У висновках сформульовані основні результати досліджень, представлених в дисертації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації розв’язане широке коло задач, що дозволило закласти основу кінетичної теорії хвиль у таких аксіально-симетричних плазмових системах з двовимірною (2D) неоднорідністю утримуючого магнітного поля, як сферичні токамаки, навколосемна і лабораторна магнітосфера, магнітні пробкотрони. На основі проведеного теоретичного і числового аналізу діелектричних характеристик і резонансної взаємодії ВЧ полів з пролітними та запертими

частинками в двовимірній-неоднорідних плазмових конфігураціях можна зробити наступні висновки:

1. Аналізуючи дисперсійне співвідношення для власних коливань плазми в 2D циліндричному пробкотроні доведено, що областю збудження і поширення швидких альфвенівських (ША) хвиль є весь об'єм плазми між магнітними дзеркалами. У швидких магнітозвукових (ШМЗ) хвиль поздовжній показник заломлення може бути знакозмінним: критерієм існування зони поширення ШМЗ хвилі є умова на густину протонів n_p . Через

розподіл n_p для ША і ШМЗ хвиль вздовж системи можна визначити умови резонансного збудження цих коливань при параметрі гіротропності μ як більшому так і меншому одиниці. У діапазоні частот ω в плазмі з'являється зона іонно-циклотронного резонансу (ІЦР), де $\omega = \Omega_i$.

2. У водневій плазмі з домішкою дейтерію при $n_p \approx 1$ з'являються зони іонно-іонного гібридного резонансу (ІІР). Присутність домішки практично не впливає на збудження ШМЗ хвиль в центральній частині пробкотрону, якщо точки відсічі розміщені від центру ближче, ніж точки ІІР. У цьому випадку поблизу ІЦР особливості мають лише ША хвилі, для яких спостерігається розщеплення гілки коливань і стають можливими трансформаційні ефекти. Якщо точки ІІР містяться від центру плазми ближче ніж точки відсічу ШМЗ хвиль, то поблизу ІЦР збуджені хвилі представляють суперпозицію ША і ШМЗ хвиль.

3. Стосовно до газодинамічних пасток отримані і проаналізовані діелектричні характеристики плазми без зіткнень у пробкотроні з 2D неоднорідністю утримуючого магнітного поля. До основних властивостей цих систем можна віднести те, що умови резонансної взаємодії хвиля-частинка в 2D пробкотроні враховують баунс-резонанси запертих частинок і істотно відрізняються від резонансних умов в 1D циліндричній плазмі. При цьому доведено, що в низькочастотному діапазоні, $\omega \ll \Omega_i$, уявна частина поздовжньої проникності (що відповідає за поглинання Ландау на електронах) зменшується з ростом температури як $\omega^{-1/2}$ і відрізняється від випадку 1D магнітного поля, де $\omega \ll \Omega_i$.

У діапазоні великих частот, $\omega \gg \Omega_i$, поздовжня діелектрична проникність не залежить від хвилевих чисел і температури плазми. Уявна частина поперечної проникності (що відповідає за іонно-циклотронне поглинання ВЧ хвиль) досягає максимальних значень, коли зона циклотронного резонансу

розміщена поблизу центральної площини пробкотрона ($r = 0$), і зменшується при наближенні зон ІЦР до магнітних дзеркал.

4. Для моделей осесиметричних токамаків з коловим, еліптичним і D-подібним перерізом магнітних поверхонь в нульовому наближенні за параметром замагніченості розв'язано лінеаризоване рівняння Власова для функцій розподілу пролітних і запертих частинок, нехтуючи дрейфовими ефектами і скінченною шириною бананових траєкторій. Розглянуті моделі токамаків з великим і малим аспектною відношенням, з концентричними магнітними поверхнями та з рівновагою за Соловйовим. Розв'язок кінетичних рівнянь проведено для

пролітних і всіх можливих груп запертих частинок, як задачі з граничними умовами, використовуючи періодичність функції розподілу пролітних частинок при обході тору по малому азимуту і неперервність функцій розподілу запертих частинок в точках віддзеркалення (точках зупинки, де $\dot{\theta} = 0$). Для розв'язку рівнянь Власова використані змінні, які асоціюються з законами збереження при русі заряджених частинок вздовж магнітного поля: кінетична енергія, магнітний момент та рівняння магнітних поверхонь. Нові часоподібні змінні (замість полоїдного кута) слід використовувати для опису баунс-періодичного руху пролітних і запертих частинок. Найбільш прості вирази елементів діелектричної проникності отримуються у системі координат з „прямими” силовими лініями утримуючого магнітного поля. Показано, що весь спектр електричного поля дає внесок в m -у полоїдну гармоніку густини струму. Внесок пролітних і запертих частинок в поперечні і поздовжню компоненти діелектричного тензора отримано через суми баунс-резонансних членів, які містять подвійне інтегрування у просторі швидкостей, резонансні знаменники, фазові коефіцієнти, еліптичні і квазіеліптичні інтегралі та функції.

5. Істотною особливістю токамаків з витягнутим перерізом є можливість існування додаткових груп запертих частинок на тих магнітних поверхнях, де модуль рівноважного магнітного поля має два (або більше) локальних мінімумів в залежності від полоїдного кута. В еліптичному токамаку критерій існування двічі запертих (d -запертих) частинок визначається як $\frac{d}{2} > \frac{1}{2} \frac{d}{d\theta} \ln \left| \frac{d\theta}{d\theta} \right|$, зв'язуючи еліптичність d , обернене аспектне відношення $\frac{d}{d\theta}$ та запас стійкості токамаку $\frac{d}{2}$ на заданій магнітній поверхні.

6. Оскільки кінетичні рівняння розв'язані як задача з граничними умовами, то отримані діелектричні характеристики застосовані до досліджень хвилевих процесів з регулярною частотою, наприклад, таких як поширення хвиль та їх дисипація при додатковому нагріванні тороїдної плазми і генерації в ній струмів захоплення ВЧ методами. Показано, що поглинута ВЧ потужність виражається через суму членів, які містять внесок пролітних і всіх можливих груп запертих частинок в уявну частину діагональних і недіагональних елементів діелектричної проникності. При цьому, уявні частини елементів поздовжньої проникності необхідні в оцінках декрементів і поглинутої ВЧ потужності через черенковський резонанс на пролітних і запертих електронах. А уявними частинами поперечної діелектричної проникності (при $l=1$) визначається дисипація хвиль через циклотронне поглинання на іонах плазми.

7. Отримані елементи компонент діелектричного тензору придатні для розвитку числових кодів розв'язку 2D рівнянь Максвела в тороїдній плазмі для ВЧ полів в діапазоні частот альфвенівських і швидких магнітозвукових хвиль. З іншого боку, ці діелектричні характеристики можуть бути проаналізовані незалежно від хвилевих рівнянь, як було продемонстровано в розрахунках черенковського поглинання хвиль на запертих і пролітних електронах в плазмах з параметрами токамаків JET, TCABR, MAST, NSTX і ETE. Аналіз уявної частини елементів поздовжньої проникності показує, що швидкі хвилі (з $\omega > \omega_{ce}$) ефективно взаємодіють з пролітними електронами практично на всіх магнітних

поверхнях, як в крутих (сферичних), так і в токамаках з великим аспектним відношенням. Заперті же електрони ефективно взаємодіють лише з повільними хвилями (наприклад, з хвилями альфвенівського типу з $\omega < \omega_{UH}$) на зовнішніх поверхнях, де їх кількість зростає і коли їх баунс-частота порівняна з частотою хвилі.

8. Через порівняння окремих баунс-резонансних членів в ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} доведено, що для пролітних частинок члени ϵ_{\parallel} і ϵ_{\perp} , при $\omega < \omega_{UH}$, є основними, як у холодній, так і гарячій плазмах. В термінах фазової швидкості, цю закономірність можна переформулювати як те, що нульовий баунс-резонансний член дає головний внесок в ϵ_{\parallel} і відповідно в декременти, як повільних хвиль з $\omega < \omega_{UH}$, так і швидких хвиль з $\omega > \omega_{UH}$. Номери ж основних баунс-резонансних членів в ϵ_{\parallel} визначаються через співвідношення частоти хвилі з баунс-частотою запертих електронів ω_{UH} на заданій магнітній поверхні радіусу r : $\omega = \omega_{UH} \pm n \omega_{UH}$. При цьому максимальне поглинання на запертих електронах слід чекати для мод з оціночними номерами $n \approx \omega / \omega_{UH}$.

9. Отримані компоненти тензору діелектричної проникності для 2D магнітосферної плазми у полі точкового і лабораторного магнітного диполя, а також для плазми в полі з коловими силовими лініями. Ці діелектричні характеристики потрібні для досліджень хвильових процесів в діапазоні частот альфвенівських і магнітозвукових хвиль, враховуючи циклотронні та баунс резонанси. Внеском резонансних пролітних і запертих частинок в антиермітовську частину поперечних і поздовжніх елементів діелектричної проникності визначаються декременти поглинання власних коливань в рівноважних магнітосферних плазмах, а також ВЧ потужність, що поглинається через черенковський та циклотронний механізми дисипації хвиль. Доведено, що внаслідок малої кількості пролітних частинок в навколомній плазмі їх внеском в 2D компоненти збуреної густини струму і відповідно в елементи компонент діелектричного тензору можна нехтувати. Але в лабораторній магнітосфері на силових лініях рівноважного магнітного поля співіснують як пролітні, так і заперті частинки. Незалежно від співвідношення між кількістю пролітних і запертих частинок в лабораторній магнітосфері, повільні хвилі з $\omega < \omega_{UH}$ поглинаються переважно запертими електронами. Однак, поглинання швидких хвиль з $\omega > \omega_{UH}$ пролітними електронами може у кілька разів перевищувати поглинання цих хвиль на запертих електронах.

10. Запропонований метод розв'язку кінетичних рівнянь в 2D аксіально-симетричних плазмових конфігураціях може застосуватися як для рівноважної, так і нерівноважної плазми. Як приклад, досліджено вплив баунс-резонансних ефектів на іонно-циклотронні хвилі в нерівноважній магнітосферній плазмі з анізотропною температурою, коли енергійні частинки мають бімаксвелівську, або білоренцевську функції розподілу у просторі швидкостей. Зокрема, отримані дисперсійні співвідношення для циклотронних хвиль, що поширюються

паралельно геомагнітному полю в магнітосферній плазмі, яка утримується або полем точкового магнітного диполя, або полем з коловими силовими лініями. Отримані дисперсійні співвідношення дозволяють аналізувати зв'язок власних частот з інкрементами (декрементами) збудження (поглинання) як ліво-поляризованих, так і право-поляризованих хвиль в 2D магнітосферних плазмах. Як у прямому магнітному полі, інкременти/декрементами циклотронних хвиль визначаються внеском резонансних частинок в уявну частину елементів поперечних компонент діелектричного тензора. Доведено, що інкремент протонно-циклотронної нестійкості в 2D магнітосфері значно менше відповідної оцінки для плазми у прямому магнітному полі.

11. Результати дисертаційної роботи забезпечують певний прогрес в дослідженнях хвиль малої амплітуди в токамаках (з великим і малим аспектним відношенням, з коловим, еліптичним і D-подібним перерізом магнітних поверхонь), в циліндричних пробкотронах, в космічній і лабораторній магнітосферній плазмі. Майбутній розвиток 2D кінетичної теорії хвиль має базуватися на вивченні впливу дрейфових ефектів і скінчених розмірів ширини орбіт траєкторій пролітних і запертих частинок на дисперсійні характеристики власних коливань плазми в токамаках і стелараторах, в магнітосфері Землі, в газодинамічних пастках з пробочною конфігурацією магнітного полю та в інших аксіально-симетричних плазмових системах. Особливу увагу слід приділити врахуванню впливу зіткнень на хвилеві процеси в тороїдних, магнітосферних і пробкотронних плазмах. Прогрес в лінійній теорії відкриває шляхи розвитку нелінійної кінетичної теорії хвиль в 2D аксіально-симетричній плазмі.

СПИСОК РОБІТ ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гришанов Н.И., Некрасов Ф.М. О диэлектрической проницаемости тороидальной плазмы // Физика Плазмы.-1990.-Т.16, № 2, -С.230-233.
2. Гришанов Н.И., Сидоров В.П., Цыпин В.С., Сила увлечения ионов добавки при ионно-циклотронном резонансе // Физика Плазмы.-1992.-Т.18, № 8.-С. 1100-1102.
3. Elfimov A.G., de Azevedo C.A., de Assis A.S., Grishanov N.I., Nekrasov F.M., Potapenko I.F., Tsypin V.S. Alfvén wave heating and current drive analysis in magnetized plasma structures // Brazil. J. Phys.-1995.-V.25, № 3.-P.224-240.
4. Grishanov N.I., Elfimov A.G., de Azevedo C.A., de Assis A.S. Short wave-length oscillations of a magnetized current-carrying plasma // Brazil. J. Phys.,-1996.- V.26, № 4.-P.731-741.
5. Nekrasov F.M., Grishanov N.I., Elfimov A.G., de Azevedo C.A., de Assis A.S. Dielectric permeability of a mirror-trapped plasma // Plasma Phys. Control. Fusion.- 1996.-V.38, № 6.-P.853-868.
6. Grishanov N.I., de Azevedo C.A., de Assis A.S. Contribution of trapped particles to the dielectric tensor of magnetospheric plasmas // J. Geophys. Res.-1996.-V.101, № A4.-P.7881-7889.
7. Grishanov N.I., Elfimov A.G., de Azevedo C.A., de Assis A.S. Influence of trapped electrons on the dielectric properties of the Earth's radiation belts // Phys. Plasmas.- 1996.-V.3, № 10.-P.3798-3808.

8. Grishanov N.I., de Azevedo C.A., de Assis A.S. Contribution of untrapped and trapped particles to the longitudinal permeability of a toroidal plasma // *Phys. Plasmas*.-1997.-V.4, № 4.-P.1055-1061.
9. Grishanov N.I., de Azevedo C.A., de Assis A.S. Longitudinal permittivity of magnetospheric plasmas with dipole and circular magnetic field lines // *Phys. Plasmas*.-1998.-V.5, № 12.-P.4384-4394.
10. Grishanov N.I., de Azevedo C.A., de Assis A.S. Longitudinal permittivity of a tokamak plasma with elliptic and circular magnetic surfaces // *Phys. Plasmas*.-1998.-V.5, № 3.-P.705-715.
11. Grishanov N.I., de Azevedo C.A., de Assis A.S. Kinetic Alfvén wave dissipation in tokamaks with elliptic magnetic surfaces // *Plasma Phys. Control. Fusion*.-1999.-V. 41, № 5.-P.645-660.
12. Grishanov N.I., de Azevedo C.A., de Assis A.S. Alfvén wave dissipation in the dipole axisymmetric magnetosphere // *J. Plasma Fusion Res. SERIES*.-1999.-V.2, № 12.-P.470-473.
13. Grishanov N.I., de Azevedo C.A., de Assis A.S. Bounce-resonant wave-particle interactions in tokamaks with elliptic magnetic surfaces // *J. Plasma Fusion Res. SERIES*.-1999.-V.2, № 12.-P.73-76.
14. Grishanov N.I., de Azevedo C.A., Neto J.P. Dielectric characteristics of axisymmetric low aspect ratio tokamak plasmas // *Plasma Phys. Control. Fusion*.-2001.-V.43, № 8.-P.1003-1021.
15. Grishanov N.I., da Silva C.E., de Azevedo C.A., de Assis A.S. Collisionless dissipation of the toroidicity-induced Alfvén eigenmodes by the trapped and untrapped electrons // *Physica Scripta*.-2001.-V.63, № 1.-P.47-52.
16. Grishanov N.I., de Azevedo C.A., Neto J.P. Collisionless dissipation of radio-frequency waves in axisymmetric tokamak plasmas // *Brazil. J. Phys*.-2002.-V.32, № 1.-P.179-186.
17. Grishanov N.I., de Azevedo C.A., de Assis A.S., Neto J.P. Kinetic equation for charged particles in axisymmetric two-dimensional magnetized plasmas // *Matematica Contemporanea*.-2002.-V.22.-P.141-162.
18. Grishanov N.I., Ludwig G.O., de Azevedo C.A., Neto J.P. Wave dissipation by electron Landau damping in low aspect ratio tokamaks with elliptic magnetic surfaces // *Phys. Plasmas*.-2002.-V.9, № 9.-P.4089-4092.
19. Grishanov N.I., Loula A.F.D., de Azevedo C.A., Pereira Neto J. Radio-frequency wave dissipation by electron Landau damping in a low aspect ratio D-shaped tokamak // *Plasma Phys. Control. Fusion*.-2003.-V.45, № 10.-P.1791-1803.
20. Grishanov N.I., Loula A.F.D., de Azevedo C.A., Pereira Neto J. Parallel permittivity elements for radio frequency waves in elongated D-shaped tokamaks // *Brazil. J. Phys*. -2004.-V.34, № 4B.-P.1556-1564.
21. Grishanov N.I., Azarenkov N.A. Electron Landau damping of radio-frequency waves in a toroidal plasma with Solov'ev equilibrium // *Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Термоядерный синтез*.-2006.-Т.12, № 6.-С.127-129.
22. Grishanov N.I., Loula A.F.D., de Azevedo C.A., Pereira Neto J. Dielectric characteristics for radio-frequency waves in a laboratory dipole plasma // *Contrib. Plasma Phys*. -2006.-V.46, № 4.-P.265-279.

23. Grishanov N.I., Raupp M.A., Loula A.F.D., Pereira Neto J. Dispersion equations for field-aligned cyclotron waves in axisymmetric magnetospheric plasmas // *Annales Geophysicae*.- 2006.-V.24, № 5.-P.589-601.
24. Grishanov N.I., Azarenkov N.A. Instability of ion-cyclotron waves in a 2D magnetospheric plasma with anisotropic temperature // *Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Термоядерный синтез*.- 2007. Т.13, № 1.-С.78-80.
25. Гришанов Н.И., Елфимов А.Г. О возбуждении объемных колебаний в плазменном пробкотроне // *Препринт СФТИ № 90-2, Москва: ЦНИИ-атоминформ, 1990. -13 с.*
26. Гарина С.М., Гришанов Н.И., Елфимов А.Г., Потапенко И.Ф. ВЧ-нагрев плазмы в газодинамической ловушке // *Труды всесоюзного совещания по открытым ловушкам, (Москва, октябрь 1989), 1989. -С.82-90.*

Анотація

Гришанов М.І. Діелектричні властивості плазми без зіткнень у двовимірній-неоднорідній аксіально-симетричній магнітній пастці. -
Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми. – Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків, 2007.

В дисертації розвинута кінетична теорія хвиль в беззіткненній плазмі таких 2D систем, як токамаки (з великим і малим аспектним відношенням; з коловим, еліптичним і D-подібним перерізом концентричних магнітних поверхонь; з рівновагою за Соловйовим), магнітосфера Землі, магнітосферна плазма в лабораторних умовах, циліндричні пробкотрони.

Отримано і проаналізовано основний внесок пролітних і запертих частинок в елементи поздовжньої і поперечних компонент тензору діелектричної проникності для електромагнітних хвиль в перелічених моделях плазми. Досліджено вплив баунс-резонансів на дисперсійні характеристики альфвенівських і магнітозвукових хвиль в рівноважній тороїдній, циліндричній та магнітосферній плазмах.

Отримані дисперсійні співвідношення для хвиль в 2D магнітосферній плазмі з анізотропною температурою. Досліджена нестійкість іонно-циклотронних хвиль у водневій плазмі поблизу геостаціонарних орбіт магнітосфери Землі. Доведено, що інкремент цієї нестійкості в 2D магнітосфері значно менше відповідного інкремента в 1D моделях плазми у прямому магнітному полі.

Ключові слова: кінетична теорія хвиль, рівняння Власова, аксіально-симетрична плазма, двовимірній-неоднорідній магнітний поле, токамак, пробкотрон, магнітосфера Землі, заперті і пролітні частинки, баунс резонанси.

Summary

Grishanov N.I. Dielectric properties of a collisionless plasma in the two-dimensional axisymmetric magnetic traps. Manuscript.

Thesis for the scientific degree of doctor in physical and mathematical sciences by speciality 01.04.08 plasma physics. Karazin Kharkov National University, Kharkov, 2007.

In the dissertation the kinetic wave theory is developed in a collisionless plasma of such 2D systems as tokamaks (with large and small aspect ratio; circular, elliptic and D-shaped cross-sections of the concentric magnetic surfaces; Solov'ev equilibrium), Earth's magnetosphere, magnetospheric plasma in the laboratory conditions, cylindrical mirror traps.

There are obtained and analyzed the main contribution of untrapped and trapped particles to the longitudinal and transverse dielectric tensor components for waves in the above mentioned plasma models. There are studied the influence of bounce-resonances on the dispersion characteristics of the Alfvén and magnetosonic waves in the equilibrium toroidal, cylindrical and magnetospheric plasmas.

There are obtained the dispersion relations for waves in 2D magnetospheric plasmas with anisotropic temperature. There is studied the instability of ion-cyclotron waves in the Earths magnetosphere nearby the geostationary orbits. It is shown that the increment of this instability is much less than the corresponding expression for 1D plasma models in the straight magnetic field.

Key words: kinetic wave theory, Vlasov equation, axisymmetric plasma, two-dimensional magnetic field, tokamak, mirror trap, Earths magnetosphere, trapped and untrapped particles, bounce resonances.

Аннотация

Гришанов Н.И. Диэлектрические свойства бесстолкновительной плазмы в двумерно-неоднородных аксиально-симметричных магнитных ловушках. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. – Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, 2007.

В диссертации развита самосогласованная кинетическая теория волн, учитывающая их взаимодействие с пролетными и запертыми частицами в бесстолкновительной плазме таких систем как токамаки (с большим и малым аспектным отношением; с круглым, эллиптическим и D-подобным сечением концентрических магнитных поверхностей; с равновесием по Соловьеву), магнитосфера Земли и других планет, магнитосферная плазма в лабораторных условиях, цилиндрические пробкотроны. Все эти системы относятся к классу двумерно-неоднородных аксиально-симметричных плазменных конфигураций с минимумом удерживающего магнитного поля в экваториальной плоскости.

Основной вклад пролетных и запертых частиц в двумерные компоненты плотности электрического тока и, соответственно, в элементы продольной и поперечной диэлектрической проницаемости для перечисленных моделей плазмы получен на основании решения уравнений Власова в нулевом приближении по параметру замагниченности. Показано, что в вытянутых токамаках появляется возможность существования дополнительных групп запертых частиц на тех поверхностях, где модуль равновесного магнитного поля имеет два (или более) локальных минимума в зависимости от полоидального угла. Применительно к эллиптическим токамакам получен критерий существования дважды-запертых (*d*-запертых) частиц,

, как условие на эллиптичность (),

обратное аспектное отношение () и запас устойчивости токамака ().

Поскольку кинетические уравнения решены, как задача с граничными условиями, то полученные диэлектрические характеристики применимы к исследованию волновых процессов с регулярной частотой, например, таких как распространение волн и их диссипация при ВЧ нагреве и генерации токов увлечения. Показано, что ВЧ мощность, поглощаемая в плазме, выражается через сумму членов, содержащих вклад пролетных и всех возможных групп запертых частиц в мнимую часть диагональных и недиагональных элементов

диэлектрической проницаемости. При этом мнимая часть элементов продольной проницаемости необходима при оценке декрементов и поглощаемой мощности за счет черенковского резонанса на пролетных и запертых электронах. А мнимой частью поперечной проницаемости определяется диссипация волн за счет циклотронного поглощения на пролетных и запертых ионах.

В расчетах черенковского поглощения волн на запертых и пролетных электронах в тороидальной плазме показано, что быстрые волны с фазовыми

скоростями эффективно взаимодействуют с пролетными электронами практически на всех магнитных поверхностях, как в крутых (сферических) токамаках, так и в токамаках с большим аспектным отношением. Запертые же электроны эффективно взаимодействуют лишь с медленными волнами (например, альфвеновского типа при) на внешних магнитных поверхностях, где их количество возрастает как , а баунс-частота сравнима с частотой волны.

Впервые получены дисперсионные уравнения для циклотронных волн, распространяющихся параллельно геомагнитному полю, в 2D магнитосферной плазме с анизотропной температурой. В качестве стационарного (но неравновесного) распределения энергичных частиц рассмотрены бимаксвелловская и билоренцевская функции распределения. Исследована протонно-циклотронная неустойчивость электромагнитных ионно-циклотронных волн вблизи геостационарных орбит магнитосферы Земли. Показано, что инкремент этой неустойчивости в 2D магнитосфере существенно ниже соответствующего инкремента в 1D моделях плазмы в прямом магнитном поле.

Ключевые слова: кинетическая теория волн, уравнение Власова, аксиально-симметричная плазма, двумерно-неоднородное магнитное поле, токамак, пробкотрон, магнитосфера Земли, пролетные и запертые частицы, баунс резонансы.