

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

МОІСЕЄНКО ВОЛОДИМИР ЄВГЕНОВИЧ

УДК 533.9, 621.0

**ВИСОКОЧАСТОТНІ ПЛАЗМОВІ РОЗРЯДИ В ПРОБКОТРОНАХ І
СТЕЛАРАТОРАХ**

01.04.08 – фізика плазми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті фізики плазми Національного наукового центру “Харківський фізико – технічний інститут” НАН України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор, член-кор. НАНУ **Гаркуша Ігор Євгенійович**,
ІНЦ Харківський фізико-технічний інститут,
заступник генерального директора.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник **Гришанов Микола Іванович**,
Український державний університет залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри «Фізика»;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник **Лісовський Валерій Олександрович**,
Харківський національний університет імені
В. Н. Каразіна, професор кафедри матеріалів
реакторобудування та фізичних технологій;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник **Луценко Вадим Васильович**,
Інститут ядерних досліджень НАН України,
провідний науковий співробітник.

Захист дисертації відбудеться ”14” травня 2021 р. о 14-00 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. Виробництво енергії було, є і буде нагальною проблемою для людства. На поточний момент головним джерелом енергії в світі є спалювання корисних копалин, таких як нафта, вуглець і газ. Їх запаси не дуже великі, і за нинішнім темпом споживання можуть бути вичерпані за кілька сотень років. Ширше використання відновлених джерел енергії (сонячне світло, вітер, морські течії, тощо) робить внесок, але повністю не може вирішити усю проблему тому, що ці джерела низько концентровані. Найбільш високу концентрацію енергії має ядерне паливо, і це є одною з причин його високої привабливості.

Нинішній спосіб використання ядерної енергії приводить до значних проблем, пов'язаних великою радіоактивністю відпрацьованого ядерного палива. Ця радіоактивність знижується і досягає прийнятного рівня за великий проміжок часу – 300 тисяч років. Тому варто розглядати варіанти поводження з відпрацьованим ядерним паливом інші, ніж зберігання.

Для отримання енергії реакцію синтезу планується здійснювати в гарячій (~10 кеВ) тороїдальній плазмі токамака або стеларатора. Паливом послугує дейтерій і тритій. Дейтерію багато у воді, тому він практично невичерпний. Тритій – синтетичний ізотоп водню з малим періодом напіврозпаду (12 років). Він зазвичай виробляється з літію, якого багато в земній корі. З цієї причини термоядерний синтез спроможний забезпечити людство енергією на протязі довгого часу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертаційну роботу виконано в ІФП ННЦ ХФТІ відповідно до планів науково-дослідних робіт і програм у межах наступних тем: III-3-11 (ІФП).(2016-2020) Дослідження високочастотного утворення та нагрівання плазми, а також її утримання у тороїдальних магнітних пастках стелараторного типу з диверторною і лімітерною конфігурацією. Проробка концепції ядерно-термоядерного підкритичного реактора на основі стеларатора. № держреєстрації 0116U006160; П-3/22 (2017-2019). Дослідження в стеллараторах Ураган-2М та 3М структури плазмового шнура, МГД активності плазми та ВЧ способів створення і нагрівання плазми. № держреєстрації 0117U005084; - III-3-11 (2011-2015). Дослідження ВЧ методів створення і нагрівання плазми з низькими частотами зіткнень та утримання її в стелараторних пастках з різними характеристиками магнітної конфігурації. № держреєстрації № 0111U009608; - X-5-5 (2011-2012). Розробка та впровадження на установці У-2М комбінованої магнітної конфігурації стеларатора з відкритою пасткою як прототипу конфігурації нейтронного джерела підкритичної гібридної системи «ядерне ділення-синтез» та інсталяція корпускулярної діагностики. № держреєстрації 0111U009604; П-3/22 (2014-2015). Експериментальне і теоретичне моделювання фізичних процесів у великих термоядерних установках з дивертором. № держреєстрації 0114U001808; X-5-3 (2013-2015). Розробка та впровадження нового методу діагностики плазми на основі багато-частотної

надвисокочастотної рефлектометрії на установці Ураган-2М і утримання плазми в комбінованій магнітній конфігурації стеларатора з відкритою пасткою для моделювання нейтронного джерела підкритичної гібридної системи «ядерний поділ-синтез». № держреєстрації 0113U006380; - Україна-Словенія, М/294-2013, М/124-2014. Проведення досліджень ефективності очистки стінок вакуумної камери установки Ураган-2М в різних режимах утворення ВЧ плазми з залученням оптичних, зондових та мас-спектрометричних вимірювань; Грант Українського науково-технологічного центру (УНТЦ) №4216. Радіочастотне утворення і нагрівання плазми в стелараторі Ураган-2М; Грант Українського науково-технологічного центру (УНТЦ) №6057. Критичні питання взаємодії плазми з поверхнею в міжнародному термоядерному реакторі ІТЕР; ІІІ-3-16 (ІФП).2016-2020 Дослідження високочастотного утворення та нагрівання плазми, що утримується у тороїдальних магнітних пастках стелараторного типу № держреєстрації 0116U006160; Проект МАГATE F1.30.15. Conceptual development of steady-state compact fusion neutron sources, Coordinated Research; Проект МАГATE F13018 Development of Steady-State Compact Fusion Neutron Sources; Проект Стеларатор-1 (EUROfusion), частина S1.X.1.A.T2 Підготовка стінок Урагана-2М.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження: розв'язання крайової задачі для рівнянь Максвелла при числових розрахунках електромагнітних полів, побудова стабільних числових моделей; винайдення нових схем високочастотного нагрівання плазми відкритих пасток (пробкотронів); впровадження ефективних схем високочастотного нагрівання плазми на установках Ураган; розвиток методів очистки внутрішніх вакуумних поверхонь термоядерних установок високочастотними розрядами та розробка концепції термоядерно-ядерного гібриду для трансмутації відпрацьованого ядерного палива. У роботі поставлено такі завдання, спрямовані на досягнення цієї мети:

- Розробити чисельно стійкий метод зважених нев'язок і модель для рівнянь Максвелла у циліндричній геометрії.
- Розробити модель для розрахунку електромагнітних полів в плазмі осесиметричних відкритих пасток без урахування повільних хвиль.
- Розробити метод і модель для розрахунку електромагнітних полів в плазмі тривимірних відкритих пасток.
- Розробити метод для розрахунків із сильно осцилюючими розв'язками.
- Винайти підхід для моделювання шару нижнього гібридного резонансу за допомогою скінчених елементів.
- Винайти альтернативну форму рівнянь Максвелла більш придатну щодо дискретизації.
- Зробити порівняльний аналіз методів високочастотного нагрівання плазми в пробкотронах.
- Зробити моделювання іонно-циклотронного нагрівання іонів, що плещуться, у відкритій пастці з прямими силовими лініями.

- Розробити сценарій нагрівання іонів, що плещуться, на другій циклотронній гармонії у відкритій пастці з прямими силовими лініями.
- Зробити детальний аналіз сценарію швидкого нагрівання плазми в пробкотроні під час її створення.
- Теоретично дослідити проникнення електростатичного поля через Фарадеїв екран напіввиткової антени.
- Провести і проаналізувати експерименти з високочастотного нагрівання плазми на Урагані-3М з використанням трьох-напіввиткової антени.
- Проаналізувати особливості поточних розрядів в торсатроні Ураган-3М.
- Впровадити і дослідити високочастотне нагрівання плазми в Урагані-2М.
- Запропонувати, впровадити і дослідити на Урагані-2М сценарій високочастотної чистки внутрішніх вакуумних поверхонь за допомогою безперервного УКХ розряду.
- Запропонувати і дослідити на стелараторі Wendelstein7-X сценарій високочастотної чистки внутрішніх вакуумних поверхонь у режимі ультракоротких імпульсів електронно-циклотронного нагрівання в атмосфері водню.
- Зробити детальне дослідження на Урагані-3М імпульсної високочастотної чистки в малому магнітному полі.
- Розробити концепцію стелараторно-пробкотронного ядерно-термоядерного гібриду, описати її та зробити оцінки щодо балансу енергії.
- Провести моделювання щодо концепції стелараторно-пробкотронного гібриду з інжекцією нейтральних атомів.
- У стелараторно-пробкотронному режимі роботи Урагана-2М дослідити рух швидких іонів, створених високочастотним нагріванням.

Об'єкт дослідження: плазма з електромагнітними полями в термоядерних установках.

Предмет дослідження: крайова задачі для рівнянь Максвела для числових розрахунків електромагнітних полів у плазмі, числово-стабільні числові моделі; новітні схеми високочастотного нагрівання плазми відкритих пасток (пробкотронів); ефективні схеми високочастотного нагрівання плазми на установках Ураган; методи очистки внутрішніх вакуумних поверхонь термоядерних установок високочастотними розрядами та концепція термоядерно-ядерного гібриду для трансмутації відпрацьованого ядерного палива.

Методи дослідження. У дисертації застосовуються відомі аналітичні експериментальні, та числові методи: методи скінченних елементів та скінченних різниць в різних варіантах, числовий метод штрафів та метод LU-розкладання матриць для отримання числових розв'язків. При проведенні і аналізі експериментів на експериментальних установках використовувались стандартні калібровані і сертифіковані діагностики, зокрема вимірювання густини плазми за допомогою інтерферометра, інтенсивності випромінювання

спектральних ліній за допомогою монохроматорів, інтенсивності електронно-циклотронного випромінювання плазми, тощо. При моделюванні кінетики швидких іонів використовувались стандартні аналітичні методи, а також збереження загально відомих інваріантів руху, а саме: енергії, магнітного моменту та поздовжнього інваріанту.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше у світі отримано такі результати:

- Розроблений чисельно стійкий метод зважених нев'язок і модель для рівнянь Максвела у циліндричній геометрії, де всі компоненти електричного поля представлені за допомогою однакових скінченних елементів.
- Розроблена оригінальна чисельно стійка модель для розрахунку електромагнітних полів в плазмі осесиметричних відкритих пасток без урахування повільних хвиль.
- Запропонований новітній метод і розроблена модель для розрахунку електромагнітних полів в плазмі неосесиметричних відкритих пасток без урахування повільних хвиль.
- Розроблений оригінальний і ефективний метод для розрахунків із сильно осцилюючими розв'язками.
- Винайдений підхід для моделювання шару нижнього гібридного резонансу за допомогою скінченних елементів, який забезпечує мінімальну похибку розрахунків.
- Вперше зроблено порівняльний аналіз методів високочастотного нагрівання плазми в пробкотронах.
- Вперше зроблено моделювання іонно-циклотронного нагрівання іонів, що плещуться, у відкритій пастці з прямими силовими лініями.
- Вперше обґрунтований та запропонований ефективний сценарій нагрівання іонів, що плещуться, на другій циклотронній гармоніці у відкритій пастці з прямими силовими лініями.
- Зроблений детальний аналіз запропонованого дисертантом сценарію швидкого нагрівання плазми в пробкотроні під час її створення показав його значну ефективність.
- Теоретичне дослідження проникнення електростатичного поля через Фарадеїв екран напіввиткової антени вперше показало значну перевагу двошарового екрану.
- В експериментах з високочастотного нагрівання плазми на Урагані-3М з використанням трьох-напіввиткової антени вперше значно підвищені параметри плазми.
- Аналіз особливостей регулярних розрядів в торсатроні Ураган-3М показав високу ефективність високочастотного нагрівання плазми на фоні вад магнітної конфігурації Урагана-3М.
- Вперше впроваджено і досліджено високочастотне нагрівання плазми в Урагані-2М.

- Вперше запропонований, впроваджений і досліджений на Урагані-2М сценарій високочастотної чистки внутрішніх вакуумних поверхонь за допомогою безперервного УКХ розряду показав високу швидкість очистки.
- Вперше досліджено на стелараторі Wendelstein7-X сценарій високочастотної чистки внутрішніх вакуумних поверхонь у режимі ультракоротких імпульсів електронно-циклотронного нагрівання в атмосфері водню.
- Вперше зроблено детальне дослідження на Урагані-3М імпульсної високочастотної чистки в малому магнітному полі.
- Розроблено оригінальну концепцію стелараторно-пробкотронного ядерно-термоядерного гібриду та зроблені оцінки щодо балансу енергії.
- Вперше проведено моделювання щодо концепції стелараторно-пробкотронного гібриду з інжекцією нейтральних атомів.
- Вперше виконано дослідження руху швидких іонів, створених високочастотним нагріванням стеларатор-пробкотронному режимі роботи Урагана-2М.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані в дисертаційній роботі результати роблять внесок у розвиток фізики плазми, методів ВЧ нагрівання плазми, методів ВЧ чищення стінок вакуумної камери термоядерних установок та методів поводження з відпрацьованим ядерним паливом.

- Розроблені числові підходи і методи реалізовані в моделях і використовуються в ІФП ННЦ ХФТІ. Розроблений чисельно стійкий метод зважених нев'язок і модель для рівнянь Максвелла у циліндричній геометрії, де всі компоненти електричного поля представлені за допомогою однакових скінченних елементів використовується в коді ТОМАТОР-1D (Лабораторія фізики плазми Королівської військової академії, Брюссель, Бельгія).
- Вивчені сценарії нагрівання плазми в пробкотронах будуть залучені при проектуванні нейтронного джерела на базі пробкотрона.
- Розроблені сценарії високочастотного нагрівання плазми в стелараторах використовуються на стелараторі Ураган-2М. Їх можна застосовувати на інших стелараторах і токамаках.
- Впроваджений на Урагані-2М сценарій високочастотної чистки внутрішніх вакуумних поверхонь за допомогою безперервного УКХ розряду показав високу швидкість очистки і регулярно використовується на цій установці. Він буде запропонований для токамака JT-60SA. Будуть продовжені роботи на стелараторі Wendelstein7-X у рамках другої кампанії.
- Розроблена концепція гібридного реактору конкурентоспроможна і буде запропонована для подальших досліджень.

Особистий внесок здобувача. Роботи [28-31] виконані здобувачем одноосібно. У роботах [2-10,12,14,15,21,22,26,32] здобувач запропонував ідею

досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтори прийняли участь в обговоренні отриманих результатів. Окрім того:

- У роботах [1,16,17,20,24,34] здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні розрахунки, прийняв участь в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтори прийняли участь у вимірюваннях параметрів плазми в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті.

- У роботі [1] запропонував Т-подібну антену, прийняв участь в аналізі результатів та написанні статті. Співавтори прийняли участь в експериментах, в аналізі результатів та вимірювали параметри плазми.

- У роботах [11 і 23] здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, прийняв участь у виводі рівнянь, запропонував алгоритм обчислень, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні доповіді та статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. М.Б. Древаль прийняв участь у виводі рівнянь, написав числову програму, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті і доповіді. Усі співавтори прийняли участь в обговоренні результатів.

- У роботах [13 і 25] здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, прийняв участь в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Необхідно відмітити, що в цій дисертації використані тільки розділи 1 і 2 роботи [13], причому не використовується матеріал розділу 1, присвячений роботі рамкової антени. М.Б. Древаль забезпечив необхідний режим роботи установки.

- У роботах [18, 27] здобувач зробив огляд поточного стану досліджень, додатково зробив аналітичні розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Усі співавтори прийняли участь в аналізі та обговоренні результатів.

- У частині 2 роботи [19], яка увійшла до дисертації, розрахунки виконані здобувачем одноосібно. Для цих розрахунків співавтори надали карту магнітного поля Урагана-2М з одною відключеною котушкою тороїдального магнітного поля та прийняли участь в обговоренні результатів.

- У роботі [33] запропонував Т-подібну антену, прийняв участь в аналізі результатів та написанні статті. Співавтори прийняли участь в експериментах, в аналізі результатів та вимірювали параметри плазми.

Апробація матеріалів дисертації. Матеріали дисертації були представлені на:

Спільному (6th APCPST, 15th SPSM, OS2002, і 11th KAPRA) міжнародному симпозіумі з плазми (2002 р., острів Чаджу, Корея); 9-ій Технічній нараді МАГАТЕ з питань енергетичних частинок в системах

магнітного утримання, (2005 р., Такаяма, Японія); 33-ій конференції ЄФТ з фізики плазми. (2006 р., Рим, Італія); Другому міжнародному практикумі та літній школі з фізики плазми (2006 р., Кітен, Болгарія); VI-ій Міжнародній конференції з питань відкритих магнітних систем для утримання плазми, (2006 р., Цукуба, Японія); 17-ій тематичній конференції з радіочастотної енергії у плазмі, (2007 р., Клеаватер, Флорида, США); 35-ій конференції ЄФТ з фізики плазми. (2008 р., Херсоніссос, Крит); 18-ій технічній нараді МАГАТЕ з «Дослідження за допомогою малих термоядерних пристроїв» (2008 р., Алушта, Україна); 25-му Симпозіумі з термоядерних технологій (2008 р., Росток, Німеччина); 36-ій конференції ЄФТ з фізики плазми. (2009 р., Софія, Болгарія); Науковій нараді з ядерно-термоядерних реакторів (2009р., Гайзерсбург, Мериленд, США); 3-ій технічній нараді МАГАТЕ від "Перші покоління термоядерних електростанцій - дизайн та технології" (2009 р., Відень, Австрія); 17-му міжнародному семінарі зі стелараторів-геліотронів (2009 р., Принстон, США); 37-ій конференції ЄФТ з фізики плазми. (2010 р., Дублін, Ірландія); VIII-ій Міжнародній конференції з питань відкритих магнітних систем для утримання плазми, (2010 р., Новосибірськ, Росія); Дев'ятому засіданні Координаційного комітету з питань іонного циклотронного нагрівання (2011 р., Кадараш, Франція); Міжнародному семінарі на тему «термоядерний синтез для нейтронів і підкритичного ядерного реактору» (2011 р., Варенна, Італія); Українській конференції з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (2011 р., Київ, Україна); Першому координаційно-дослідному засіданні на тему: "Концептуальна розробка компактних джерел нейтронного синтезу стаціонарного стану" (2012 р., Відень, Австрія); IX-ій Міжнародній конференції з питань відкритих магнітних систем для утримання плазми, (2012 р., Цукуба, Японія); 7-ій Технічній нараді МАГАТЕ "Стаціонарна робота магнітних пристроїв синтезу" (2013 р., Екс-ан-Прованс, Франція); Українській конференції з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (2013 р., Київ, Україна); 25-ій конференції МАГАТЕ з термоядерної енергії (2014 р., Санкт-Петербург, Російська Федерація); Другій науково-дослідній зустрічі координаційного науково-дослідного проекту на тему "Концептуальна розробка компактного джерел нейтронів синтезу стаціонарного стану" (2014 р., Відень, Австрія); Восьмій технічній нараді з питань сталого функціонування приладів магнітного синтезу (2015 р., Нара, Японія); 20-му міжнародному семінарі зі стелараторів-геліотронів (2015 р., Грайфсвальд, Німеччина); II Міжнародній конференції з термоядерного синтезу для нейтронів і підкритичного ядерного реактору для управління відходами та безпекою (2016 р., Фраскаті, Італія); Третій науково-дослідній зустрічі координаційного науково-дослідного проекту на тему "Концептуальна розробка компактного джерела нейтронів синтезу стаціонарного стану" (2016 р., Відень, Австрія); 15-му засіданні координаційної робочої групи зі стелараторів (2016 р. , Грайфсвальд, Німеччина); 16-му засіданні координаційної робочої групи зі стелараторів (2017 р. , Мадрид, Іспанія); Першій науково-дослідній зустрічі координаційного науково-дослідного проекту на тему "Розробка компактного

джерела нейтронів синтезу стаціонарного стану" (2018 р., Відень, Австрія); 19-му засіданні координаційної робочої групи зі стелараторів (2019 р. , Берлін, Німеччина); Українській конференції з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (2019 р., Київ, Україна); 22-му міжнародному семінарі зі стелараторів-геліотронів (2019 р. , Медісон, США); Другій науково-дослідній зустрічі координаційного науково-дослідного проекту на тему "Розробка компактного джерела нейтронів синтезу стаціонарного стану" (2020 р., Відень, Австрія)

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковані 34 наукові праці, серед яких 1 стаття [1] у виданні України, що індексується в міжнародних наукометричних базах; 19 статей [2-20] в зарубіжних виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах; 7 – публікацій [21-27] апробаційного характеру; 7 – публікацій [28-34], що додатково відображають наукові результати дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Загальний обсяг дисертації складає 320 сторінок, з них 271 сторінка основного тексту. Дисертаційна робота містить 135 рисунків. Список використаних джерел містить 163 найменування на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У дисертаційній роботі представлені розроблені та вдосконалені числові методи і моделі для розрахунку високочастотних полів у плазмі, результати розрахунків щодо високочастотного нагрівання плазми в пробкотронах, результати експериментальних досліджень високочастотного нагрівання плазми в стелараторах Ураган-3М і Ураган-2М, результати експериментів і теоретичних розрахунків щодо очищення внутрішніх вакуумних поверхонь установок Ураган-3М, Ураган-2М і Wendelstein7-X (Німеччина) та наведено розрахунки, які обґрунтовують нову стелараторно-пробкотронну схему гібридного термоядерно-ядерного реактору.

У вступі обґрунтовується важливість і актуальність теми дисертаційної роботи та необхідність дослідження високочастотних розрядів у пробкотронах, стелараторах та стелараторно-пробкотронних гібридах, показано зв'язок цих досліджень з науковими програмами і темами, сформульовано мету і завдання досліджень, розкрито наукову новизну одержаних результатів та їхнє практичне значення, визначено особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих разом із співавторами, наведено відомості про апробацію результатів та публікації за темою дисертації.

У першому розділі описані нові підходи до дискретизації рівнянь Максвелла та числові моделі, що їх реалізують.

Описаний новий чисельно стійкий метод зважених нев'язок і модель для рівнянь Максвелла у циліндричній геометрії, де всі компоненти електричного поля представлені за допомогою однакових скінченних елементів. Так само як і

метод Гальоркіна, який часто використовується для дискретизації рівнянь Максвелла, записаних для електричного поля, метод є чисельно стійким. Він більш ефективний, ніж метод Гальоркіна, коли жорсткість має місце в рівняннях Максвелла (Див. Рис. 1).

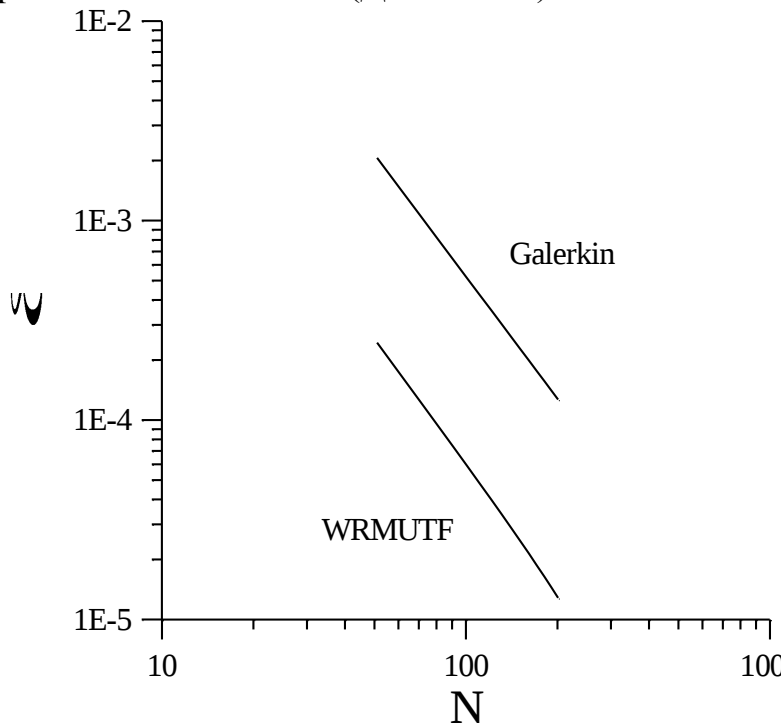


Рис.1. Відносна похибка δ як функція числа вузлів сітки N для метода Гальоркіна (Galerkin) і запропонованого методу (WRMUTF).

локальний, так і нелокальний підходи до врахування діелектричного відгуку плазми. Врахований нелокальний ефект - це нелокальний відгук резонансних іонів, обумовлений їх тепловим рухом уздовж магнітного поля поблизу зони основного циклотронного резонансу. Цей ефект є найбільш важливим для опису циклотронного загасання швидкої магнітозвукової хвилі.

Запропонований новітній метод і розроблена модель для розрахунку електромагнітних полів в плазмі неосесиметричних відкритих пасток без урахування повільних хвиль. Нова числова модель обчислення розподілу та поглинання радіочастотних полів іонами, що плещуться. Модель вирішує гармонійні в часі рівняння Максвелла, записані через електричне поле. Вона використовує 2D звичайну сітку, не вирівняну вздовж постійного магнітного поля, та ряд Фур'є у 3-й координаті.

Описаний оригінальний і ефективний метод для розрахунків із сильно осцилюючими розв'язками. Він призначений вирішити важливу проблему моделювання сильно коливальних полів методами дискретизації. Зазвичай потрібна дуже густа сітка, в результаті чого зростають вимоги до обчислювальних ресурсів і витрати часу на обчислення. Запропонований метод дозволяє використовувати негусту сітку, і за рахунок цього істотно знизити обчислювальні витрати.

Метод більш зручний, оскільки всі компоненти електричного поля представлені однотипними функціями.

Розроблена оригінальна чисельно стійка модель для розрахунку електромагнітних полів в плазмі осесиметричних відкритих пасток без урахування повільних хвиль. Вона реалізована в новому модернізованому коді PLFEM-S, який відрізняється можливістю чисельно-стабільного розрахунку азимутально-несиметричних мод. У коді використовуються як

Винайдений підхід для моделювання шару нижнього гібридного резонансу за допомогою скінченних елементів, який забезпечує мінімальну похибку розрахунків. Нижній гібридний резонанс в холодній плазмі призводить до появи сингулярних розв'язків рівнянь Максвелла. Такі розв'язки неможливо відтворити стандартними дискретними методами. Застосування методу штрафів дозволяє обійти ці труднощі без великих додаткових витрат, пов'язаних з ускладненням алгоритму обчислень.

Запропонована і описана нова форма рівнянь Максвелла, яка дозволяє використовувати стандартні методи дискретизації.

У другому розділі зроблено порівняльний аналіз методів високочастотного нагрівання плазми в пробкотронах. Розглянуто схеми нагрівання плазми пробкотронів за допомогою швидкої хвилі, тобто магнітний берег, нагрівання на домішці, нагрівання на другій гармоніці, та швидке нагрівання на зіткненнях та описані їх властивості.

Вперше зроблено моделювання іонно-циклотронного нагрівання іонів, що плещуться, у відкритій пастці з прямими силовими лініями (див. Рис.2). Для великих пасток нагрівання на домішці ефективно в широкому діапазоні концентрацій добавки і густини плазми. Даний метод нагрівання може ефективно застосовуватись для легких іонів добавки.

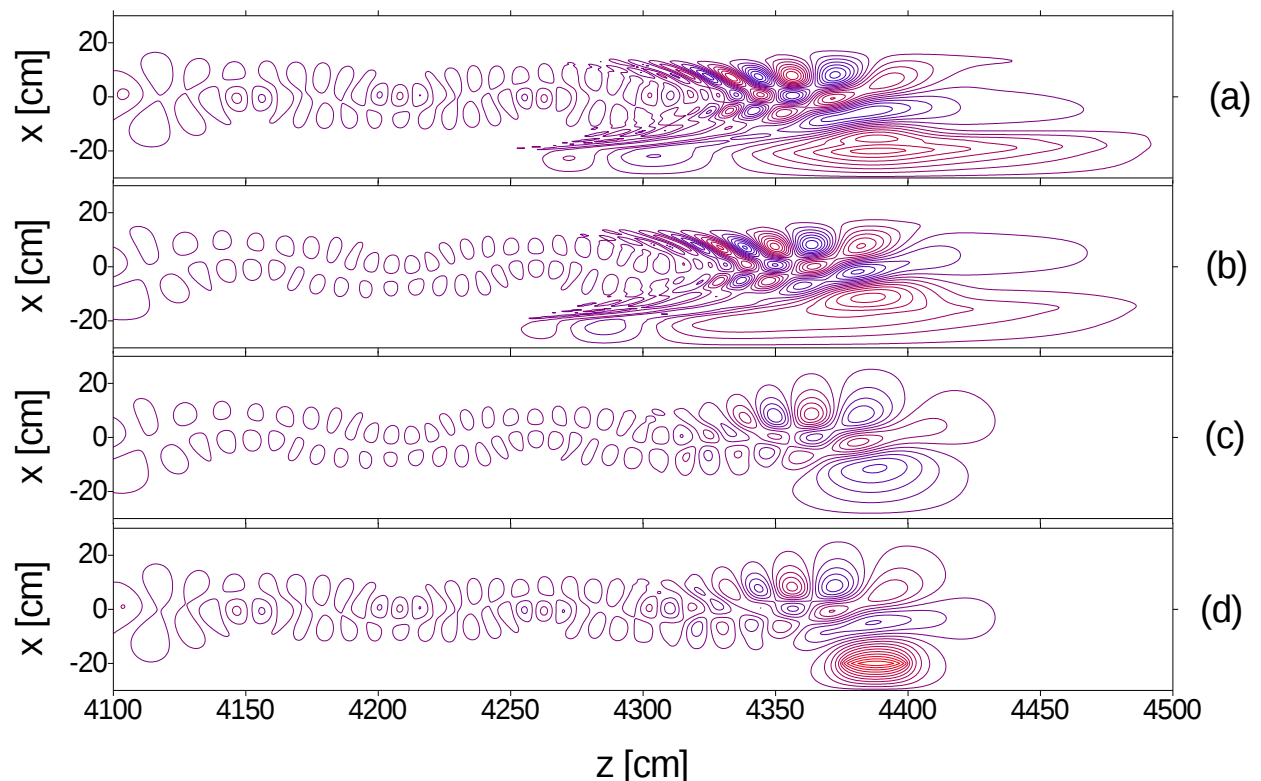


Рис. 2. Лінії рівня а) $\text{Re}E_z$, б) $\text{Im}E_z$, в) $\text{Re}E_y$ і д) $\text{Im}E_y$ у перерізі $y=0$. Червоний колір відповідає за напруженість поля 0.55 В / см , синій - 0.55 В / см . Струм антени 1 А .

Вперше обґрунтований та запропонований ефективний сценарій нагрівання іонів, що плещуться, на другій циклотронній гармоніці у відкритій пастці з прямими силовими лініями. Нагрівання на другій гармоніці може бути

застосоване для важких іонних компонентів, таких як тритій. Воно може бути реалізований в режимі перекриття глобальних резонансів. Ефективність нагрівання на другій гармонії дещо менша за рахунок слабшого загасання хвилі, ніж при нагріванні на домішці.

Зроблений детальний аналіз винайденого сценарію швидкого нагрівання плазми в пробкотроні під час її створення показав його значну ефективність. Розрахунки вказують на його перспективність для імпульсних режимів.

Теоретичне дослідження проникнення електростатичного поля через Фарадеїв екран напіввиткової антени вперше показало значну перевагу двошарового екрану. Двошаровий екран екранує електростатичне поле антени майже повністю.

Третій розділ містить описання експериментів на Урагані-3М, що продемонстрували успішність сценарію Альфвенова нагрівання з високими $k_{\parallel}$, який реалізований за допомогою компактної антени ТНВА (трьох-напіввиткової антени). Початкова густина плазми $\bar{n}_e \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ зросла в кілька

разів під час імпульсу ТНВА і контролювалася газовим напуском (див. Рис.3). Електронне нагрівання було домінуючим, але спостерігалось і деяке іонне нагрівання. Порівняно з результатами експериментів з рамковою антеною, отримана плазма з більш високим вмістом енергії. Запропонований сценарій Альфвенова нагрівання можна впровадити на великих машинах, оскільки необхідна для нього антена схожа на іонні циклотронні антени і не настільки велика, як антени, запропоновані раніше.

Аналіз особливостей регулярних розрядів в торсатроні Ураган-3М показав високу ефективність високочастотного нагрівання плазми на фоні вад магнітної конфігурації Урагана-3М. Дослідження радіальних профілів випромінювання різних оптичних ліній та електронно-циклотронного випромінювання

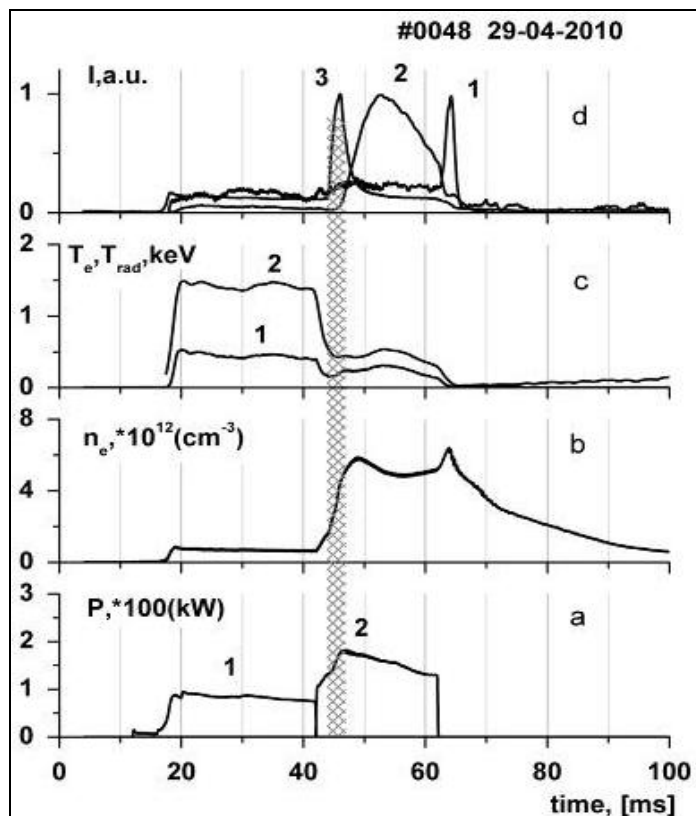


Рис. 3. Еволюція ВЧ потужності (а), густини плазми (б), ЕСЕ випромінювання (крива 1, с) та температури електронів (крива 2, с), СІІ (крива 1, д), СВ (крива 2, д) та $H\alpha$ (крива 3, д) в імпульсі з сильним імпульсним газовим напуском. Постійний тиск нейтрального газу становить $4.9 \cdot 10^{-6}$ Торр. Імпульс газового напуску показаний затіненою областю.

виявляють дві зони в плазмовому шнурі Урагана-3М, які мають різні електронні температури та властивості плазми. Центральна зона обмежена $\langle r \rangle$

< 3 см. Вона характеризується відносно високою температурою електронів, що свідчить про хороше утримання плазми. Зона з холодними електронами і гіршим утриманням оточує гаряче ядро і поширюється до краю плазми, $\langle r \rangle = 12$ см. Профіль температури електронів занадто пікований, щоб пояснити це фокусованим радіочастотним нагріванням. Аналіз стандартної магнітної конфігурації Ураган-3М показує, що система вкладених магнітних поверхонь існує лише в центральній зоні, що може спричинити наявну картину нагрівання плазми. Є кілька варіантів змінити конфігурацію, щоб площа вкладених магнітних поверхонь стала ширшою. Магнітна конфігурація, зміщена всередину, є перспективним вибором у цьому відношенні.

Вперше впроваджено і досліджено високочастотний нагрівання плазми в Урагані-2М. Нова колінчастовальна антена нагріває плазму на частотах нижче іонної-циклотронної частоти. Розряд, який підтримується цією антеною, стає «гарячим» протягом декількох мілісекунд, а потім згасає під сильним припливом домішок у плазму. Досліджено радіальні профілі оптичних випромінювань OV та CV. Обидва порожнисті, особливо OV профіль. Це може бути пояснено деяким вигоранням іонів O^{4+} та C^{4+} поблизу магнітної осі завдяки високій електронній температурі.

У четвертому розділі описується запропонований, впроваджений і досліджений на Урагані-2М сценарій високочастотної чистки внутрішніх вакуумних поверхонь у атмосфері водню за допомогою безперервного УКХ розряду, який показав високу швидкість очистки. Чистка проводилась за допомогою спеціально розробленої малої антени.

Розряд, запалений антеною, відноситься до об'ємних: плазма займає увесь об'єм утримання і навіть виходить за його межі. Параметри розряду були виміряні в широких межах утримуючих магнітних полів і тисків нейтрального газу. Вони не продемонстрували жодної значної залежності від умов розряду, а саме тиску нейтрального газу і напруженості магнітного поля. Дані мас-спектрометрії залишкових газів вказують на ефективність чистки УКХ розрядами. Числове моделювання вказує на недостатню придатність використаної рамкової антени для УКХ розряду: її опір при навантаженні замалий для хорошого електричного узгодження. Взамін рамкової було запропоновано Т-подібну антену, яка має більший електричний опір. Теоретичні оцінки свідчать про можливість використання такого розряду за високих магнітних полів, що важливо для постійно працюючих надпровідникових машин.

Сценарій короткоімпульсних серій ЕЦРН розрядів у водні був запропонований для чистки стінок вакуумної камери у W7-X. На початку експериментальної кампанії W7-X OP1.2b було успішно проведено розряди

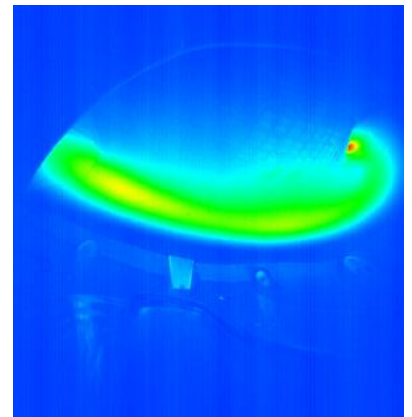


Рис. 4. Установка Wendelstein7-X. Зображення з камери QSR - Н-альфа типу 2 під час одиночного імпульсного розряду.

відповідно до запропонованого сценарію, з одним (див. Рис.4) та чотирма ЕЦРН імпульсами з використанням передіонізації. Є вказівки на те, що плазма не є повністю іонізованою (поведінка оптичних ліній, половина плазмової густини), і має місце інтенсивна генерація атомарного водню.

Проведено детальне дослідження на Урагані-3М імпульсної високочастотної чистки в малому магнітному полі. Очищуючий розряд зі збудженням швидкої магнітозвукової хвилі зручний тим, що його можна проводити, використовуючи ті ж антенні пристрої і ВЧ генератори, які використовуються для створення і нагрівання плазми в робочих режимах, причому без будь-якої зміни частоти антенних і генераторних ВЧ контурів. Розряд має досить хорошу ефективність з точки зору очищення вакуумних поверхонь. Після проведення циклу очищення низькотемпературної плазмою ВЧ розряду в робочих розрядах досягається квазістаціонарний режим і суттєво знижуються втрати енергії на випромінювання.

П'ятий розділ присвячений ядерно-термоядерному гібриду. Представлено оригінальну концепцію стелараторно-пробкотронного ядерно-термоядерного гібриду та зроблені оцінки щодо балансу енергії. Поєднання стеларатора та пробкотрона вигідно для локалізації потоку нейтронів термоядерного синтезу в пробкотронній частині пристрою, яка оточена ядерним реактором. Це дає змогу розташувати устаткування для керування розрядом та діагностику плазми подалі від реактора в зоні слабого нейтронного опромінювання (див. Рис. 5).

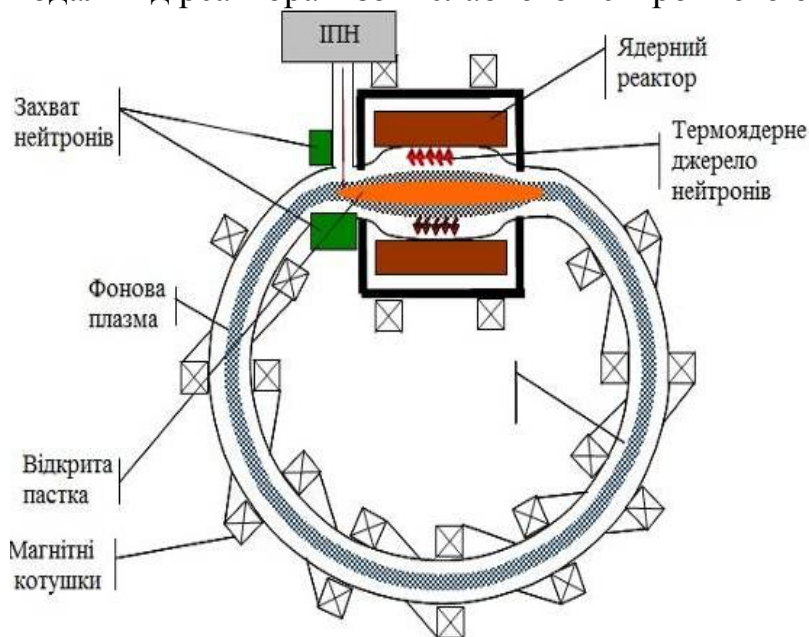


Рис.5. Схема ядерно-термоядерного реактора.

експериментальний пристрій може бути побудований для перевірки принципових ідей, і навіть за таких умов він може мати позитивний енергетичний баланс. Крім комерційного потенціалу, практичне використання таких гібридів сприяло б накопиченню знань, зокрема щодо поводження з термоядерною плазмою.

Розрахунки вказують на перспективність запропонованої схеми гібридного реактора. У широкому діапазоні його параметрів досягається високий електричний Q (відношення виробленої електричної енергії до спожитої). У масштабі електростанції плазмова частина розглянутого гібриду є досить компактною з розмірами, порівнянними з існуючими термоядерними пристроями.

Невеликий

Проведено моделювання щодо концепції стелараторно-пробкотронного гібриду з інжекцією нейтральних атомів для порівняння зі схемою з високочастотним нагріванням. Інжекція нейтрального пучка може бути використана для створення популяції гарячих іонів тритію в пробкотронній частині стелараторно-пробкотронного термоядерно-ядерного гібриду. Це може бути реалізовано без створення вхідного отвору для нейтрального пучка в ядерній частині реактора. Схема з нормальною інжекцією безпосередньо біля ядерної частини реактора призводить до певних втрат потоку термоядерних нейтронів, але більшість нейтронів утворюються всередині реактора. Результати розрахунків балансу потужності близькі до результатів, отриманих для системи з високочастотними нагріванням. Розрахований термоядерний Q знаходиться в межах необхідного діапазону.

Виконано дослідження руху швидких іонів, створених високочастотним нагріванням стеларатор-пробкотронному режимі роботи Урагана-2М. Дослідження показали погані утримуючі властивості пробкотрона, створеного в стелараторі Ураган-2М, за допомогою вимкнення однієї котушки тороїдального магнітного поля. Цей пробкотрон має недоліки, основним з яких є неоднорідність магнітного поля в напрямку великого радіуса тора. Радіальне електричне поле може суттєво поліпшити ситуацію. Примітною особливістю є поліпшення утримання для позитивних і негативних зарядів. Утримання відбувається до певного значення магнітного моменту і частинки з більшим магнітним моментом будуть дрейфувати назовні.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено новітні рішення та підходи щодо реалізації і використання високочастотних плазмових розрядів в установках керованого термоядерного синтезу таких, як стеларатор, пробкотрон і гібрид стеларатора і пробкотрона. Найважливіші здобуті фізичні результати і отримані висновки можна сформулювати наступним чином.

Запропоновані, розроблені та вдосконалені числові методи і моделі для розв'язання рівнянь Максвелла у плазмі високочастотних плазмових розрядів, які використовуються і в подальшому можуть бути використані для розв'язання практичних завдань.

- Розроблений чисельно стійкий метод зважених нев'язок і модель для рівнянь Максвелла у циліндричній геометрії, де всі компоненти електричного поля представлені за допомогою однакових скінченних елементів. Він більш ефективний, ніж метод Гальоркіна, коли жорсткість має місце в рівняннях Максвелла.
- Розроблена оригінальна чисельно стійка модель для розрахунку електромагнітних полів в плазмі осесиметричних відкритих пасток без урахування повільних хвиль. На її базі створений новий модернізований код PLFEM-S, який відрізняється можливістю чисельно-стабільного розрахунку азимутально-несиметричних мод.

- Запропонований новітній метод і розроблена модель для розрахунку електромагнітних полів в плазмі неосесиметричних відкритих пасток без урахування повільних хвиль. Вона використовує 2D звичайну сітку, не вирівняну вздовж постійного магнітного поля, та ряд Фур'є у 3-й координаті. Числова стійкість схеми забезпечена заодно зі збіжністю.
- Розроблений оригінальний і ефективний метод для розрахунків щодо задач із сильно осцилюючими розв'язками. Запропонований метод дозволяє використовувати негусту сітку і за рахунок цього істотно знизити обчислювальні витрати.
- Винайдений підхід для моделювання шару нижнього гібридного резонансу за допомогою скінченних елементів, який забезпечує мінімальну похибку розрахунків.
- Запропонована нова форма рівнянь Максвелла для числового моделювання. Ця форма забезпечує числову стійкість при стандартній процедурі дискретизації.

Проведений детальний аналіз можливостей високочастотного нагрівання плазми в пробкотронах. За допомогою розроблених числових моделей проведені розрахунки щодо вдосконалених відомих і запропонованих новітніх методів нагрівання, які надали можливість знайти ефективні сценарії. Вони будуть корисні для майбутніх нейтронних джерел та гібридних реакторів.

- Вперше зроблено порівняльний аналіз методів високочастотного нагрівання плазми в пробкотронах. Розглянуто схеми нагрівання плазми пробкотронів за допомогою швидкої хвилі, тобто магнітний берег, нагрівання на домішці, нагрівання на другій гармонії, та швидке нагрівання на зіткненнях та описані їх властивості.
- Вперше зроблено моделювання іонно-циклотронного нагрівання іонів, що плещуться, у відкритій пастці з прямими силовими лініями. Сценарій нагрівання на домішці легких іонів використовує явище конверсії хвиль і є ефективним в широкому діапазоні концентрацій добавки і густини плазми.
- Вперше обґрунтований та запропонований сценарій нагрівання іонів, що плещуться, на другій циклотронній гармонії у відкритій пастці з прямими силовими лініями. Нагрівання на другій гармонії може бути застосоване для важких іонних компонентів, таких як тритій. Ефективність нагрівання на другій гармонії дещо менша за рахунок слабшого загасання хвилі, ніж при нагріванні на домішці.
- Зроблений детальний теоретичний аналіз винайденого дисертантом сценарію швидкого нагрівання плазми в пробкотроні під час її створення показав його значну ефективність попри наявність швидких прямих втрат енергії. Цей метод можна застосовувати в існуючих відкритих пастках.

- Теоретичне дослідження проникнення електростатичного поля через Фарадеїв екран напіввиткової антени вперше показало значну перевагу двошарового екрану.

Запропонований раніш дисертантом сценарій Альфвенова нагрівання плазми за допомогою компактних антен на базі напіввиткових елементів успішно реалізований і детально досліджений на установках Ураган-3М і Ураган-2М. Він став одним із стандартних сценаріїв нагрівання плазми на цих установках і може бути застосований на інших установках, як малих, так і великих.

- В експериментах з високочастотного нагрівання плазми на Урагані-3М з використанням трьох-напіввиткової антени вперше значно підвищені параметри плазми. Експерименти продемонстрували успішність сценарію Альфвенова нагрівання з високими $k_{\parallel}$, який реалізований за допомогою компактної антени ТНВА (трьох-напіввиткової антени). Початкова густина плазми $\bar{n}_e \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ зросла в кілька разів під час імпульсу ТНВА і контролювалася газовим напуском. Електронне нагрівання був домінуючим, але спостерігалось і деяке іонне нагрівання.
- Аналіз особливостей розрядів в торсатроні Ураган-3М показав високу ефективність високочастотного нагрівання плазми на фоні вад магнітної конфігурації Урагана-3М. Дослідження радіальних профілів випромінювання різних оптичних ліній та результатів діагностики ЕСЕ виявляють дві зони в плазмовому шнурі Урагана-3М, які мають різні електронні температури та властивості плазми. Профіль температури електронів занадто пікований, щоб пояснити це фокусованим радіочастотним нагріванням. Аналіз стандартної магнітної конфігурації Ураган-3М показує, що система вкладених магнітних поверхонь існує лише в центральній зоні. Є кілька варіантів змінити конфігурацію, щоб площа вкладених магнітних поверхонь стала ширшою. Магнітна конфігурація, зміщена всередину, є перспективним вибором у цьому відношенні.
- Вперше впроваджено і досліджено високочастотний нагрівання плазми в Урагані-2М. Нова колінчастовальна антена застосована в цих експериментах. Вона нагріває плазму на частотах нижче іонно-циклотронної частоти. Розряд, який підтримується цією антеною, стає «гарячим» протягом декількох мілісекунд, а потім згасає під сильним припливом домішок у плазму. Досліджено радіальні профілі оптичних випромінювань OV та CV. Обидва порожнисті, особливо OV профіль. Це може бути пояснено деяким вигоранням іонів O^{4+} та C^{4+} поблизу магнітної осі завдяки високій електронній температурі.

Вдосконалено старі і запропоновано нові підходи щодо використання високочастотної чистки внутрішніх вакуумних поверхонь термоядерних установок за допомогою високочастотних розрядів.

- Запропонований, впроваджений і досліджений на Урагані-2М сценарій високочастотної чистки внутрішніх вакуумних поверхонь за допомогою безперервного УКХ розряду показав високу швидкість очистки. Параметри розряду були виміряні в широких межах утримуючих магнітних полів і тисків нейтрального газу. Розряд відноситься до об'ємних: плазма займає увесь об'єм утримання. Параметри розряду не продемонстрували значної залежності від умов розряду, а саме тиску нейтрального газу і напруженості магнітного поля. Теоретичні оцінки свідчать про можливість використання такого розряду за високих магнітних полів, що важливо для постійно працюючих надпровідникових машин.
- Вперше впроваджено і досліджено на стелараторі Wendelstein7-X сценарій високочастотної чистки внутрішніх вакуумних поверхонь у режимі ультракоротких імпульсів електронно-циклотронного нагрівання в атмосфері водню. Є вказівки на те, що плазма не є повністю іонізованою (поведінка оптичних ліній, половина плазмової густини), і очікується інтенсивна генерація атомарного водню, що необхідно для ефективної чистки.
- Вперше проведено детальне дослідження на Урагані-3М вдосконаленого сценарію імпульсної високочастотної чистки в малому магнітному полі. Очищуючий розряд зі збудженням ШМЗХ зручний тим, що його можна проводити, використовуючи ті ж антенні пристрої і ВЧ генератори, які використовуються для створення і нагрівання плазми в робочих режимах, причому без будь-якої зміни частоти антенних і генераторних ВЧ контурів. Розряд має досить хорошу ефективність з точки зору очищення вакуумних поверхонь.

Розроблено оригінальну концепцію стелараторно-пробкотронного ядерно-термоядерного гібриду для трансмутації відпрацьованого ядерного палива та виконані розрахунки щодо його ефективності.

- Поєднання стеларатора та пробкотрона вигідно для локалізації потоку нейтронів термоядерного синтезу в пробкотронній частині пристрою, яка оточена ядерним реактором. Розрахунки вказують на перспективність запропонованої схеми гібридного реактора. У широкому діапазоні його параметрів досягається високий електричний Q . У масштабі електростанції плазмова частина розглянутого гібриду є досить компактною з розмірами, порівнянними з існуючими термоядерними пристроями. Невеликий експериментальний пристрій може бути побудований для перевірки принципових ідей, і навіть за таких умов він може мати позитивний енергетичний баланс. Крім комерційного потенціалу, практичне використання таких гібридів сприяло б накопиченню знань, зокрема щодо поводження з термоядерною плазмою.
- Вперше проведено моделювання щодо концепції стелараторно-пробкотронного гібриду з інжекцією нейтральних атомів. Інкєкція нейтрального пучка може бути використана для створення популяції

гарячих іонів тритію в пробкотронній частині стелараторно-пробкотронного термоядерно-ядерного гібриду. Це може бути реалізовано без створення вхідного отвору для нейтрального пучка в ядерній частині реактора. Схема з нормальною інжекцією безпосередньо біля ядерної частини реактора призводить до певних втрат потоку термоядерних нейтронів, але більшість нейтронів утворюються всередині реактора. Результати розрахунків балансу потужності близькі до результатів, отриманих для системи з високочастотними нагріванням. Розрахований термоядерний Q знаходиться в межах необхідного діапазону.

- Виконано дослідження руху швидких іонів, створених високочастотним нагріванням стеларатор-пробкотронному режимі роботи Ураган-2М. Дослідження показали погані утримуючі властивості пробкотрона, створеного в стелараторі Ураган-2М, за допомогою вимкнення однієї котушки тороїдального магнітного поля. Цей пробкотрон має суттєві недоліки, основним з яких є неоднорідність магнітного поля в напрямку великого радіуса тора. Радіальне електричне поле може суттєво поліпшити ситуацію. Примітною особливістю є поліпшення утримання для позитивних і негативних зарядів. Утримання відбувається до певного значення магнітного моменту, і частинки з більшим магнітним моментом будуть дрейфувати назовні.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

публікація у фаховому виданні України, що індексується в міжнародних наукометричних базах:

1. **Moiseenko V. E.**, Lozin A. V., Kozulia M. M., Mironov Y. K., Romanov V. S., Kononov V. G. & Shapoval A. N. (2017). Alfvén plasma heating in stellarator Uragan-2M. *Ukrainian journal of physics*, 62(4), 311–317. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: у роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні розрахунки, прийняв участь в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтори прийняли участь у вимірюваннях параметрів плазми в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті.)

публікації в зарубіжних виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах:

2. **Moiseenko V. E.** & Pilipenko, V. V. (2001). Electromagnetic Field Modeling in ICRF Using Local Solution Method. *Fusion Technology*, 39(1T), 316-319. (Scopus) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував

ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтор прийняв участь в обговоренні отриманих результатів.)

3. **Moiseenko V. E., & Pilipenko V. V.** (2001). Local solution method for numerical solving of the wave propagation problem. *Computer physics communications*, 141(3), 342-349. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтор прийняв участь в обговоренні отриманих результатів.)
4. **Moiseenko, V. E., Pilipenko, V. V.** (2003). Numerically stable reduced-order ICRF fields modelling in an open trap. *Fusion Science and Technology*, 43(1T), 65-68. (Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтор прийняв участь в обговоренні отриманих результатів.)
5. **Moiseenko V. E. & Ågren O.** (2005). Radio-frequency heating of sloshing ions in a straight field line mirror. *Physics of plasmas*, 12(10), 102504. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтор прийняв участь в обговоренні отриманих результатів.)
6. **Moiseenko V. E. & Ågren O.** (2006). A numerical model for radiofrequency heating of sloshing ions in a mirror trap. *Journal of plasma physics*, 72(6), 1133-1137. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтор прийняв участь в обговоренні отриманих результатів.)
7. **Moiseenko V. E. & Ågren O.** (2007). Second harmonic cyclotron heating of sloshing ions in a straight field line mirror. *Fusion science and technology*, 51(2T), 160-163. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при

- підготовці її до опублікування. Співавтор прийняв участь в обговоренні отриманих результатів.)
8. **Moiseenko V. E. & Ågren O.** (2007, April). Fast wave heating in mirror traps. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 63, p. 012004). (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтор прийняв участь в обговоренні отриманих результатів.)
 9. **Moiseenko V. E. & Ågren O.** (2007). Second harmonic ion cyclotron heating of sloshing ions in a straight field line mirror. *Physics of plasmas*, 14(2), 022503. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтор прийняв участь в обговоренні отриманих результатів.)
 10. **Moiseenko V. E., Volkov Ye. D., Tereshin V. I., & Stadnik Yu. S.** (2009). Alfvén resonance heating in Uragan-2M torsatron. *Plasma Physics Reports*, 35(10), 828. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтори прийняли участь в обговоренні отриманих результатів.)
 11. **Moiseenko V. E., Dreval N. B., Ågren O., Stepanov K. N., Burdakov A. V., Kalinin P. V. & Tereshin V. I.** (2010). Fast wave heating in a mirror during plasma build-up. *The European Physical Journal D*, 56(3), 359-367. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, прийняв участь у виводі рівнянь, запропонував алгоритм обчислень, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та доповіді та статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. М.Б. Древаль прийняв участь у виводі рівнянь, написав числову програму, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті і доповіді. Усі співавтори прийняли участь в обговоренні результатів.)
 12. **Moiseenko V. E., Noack K. & Ågren O.** (2010). Stellarator-mirror based fusion driven fission reactor. *Journal of fusion energy*, 29(1), 65-69. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до

опублікування. Співавтори прийняли участь в обговоренні отриманих результатів.)

13. **Moiseenko V. E.**, Berezhnyj V. L., Bondarenko V. N., Burchenko P. Ya., Castejón F., Chechkin V. V., Chernyshenko V. Ya., Dreval M. B., Garkusha I. E., Glazunov G. P., Grigor'eva L. I., Hartmann D., Hidalgo C., Koch R., Konovalov V. G., Kotsubanov V. D., Kramskoi Ye. D., Kulaga A. E., Lozin A. V., Lysoivan A. I., Mironov V. K., Mysiura I. N., Pavlichenko R. O., Pashnev V. K., Romanov V. S., Shapoval A. N., Skibenko A. I., Slavnyi A. S., Sorokovoy E. L., Stadnik Yu. S., Taran V. S., Tereshin V. I. and Voitsenya V. S. (2011). RF plasma production and heating below ion-cyclotron frequencies in Uragan torsatrons. *Nuclear Fusion*, 51(8), 083036. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: у роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, прийняв участь в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Необхідно відмітити, що в цій дисертації використані тільки розділи 1 і 2 роботи, причому не використовується матеріал розділу 1, присвячений роботі рамкової антени. М.Б. Древаль забезпечив необхідний режим роботи установки.)
14. **Moiseenko V. E.**, Ågren O., & Noack K. (2011). Radio-frequency heating in straight field line mirror neutron source. *Fusion Science and Technology*, 59(1T), 132-135. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтори прийняли участь в обговоренні отриманих результатів.)
15. **Moiseenko V. E.** & Ågren O. (2013). Stellarator-mirror hybrid with neutral beam injection. *Fusion Science and Technology*, 63(1T), 119-122. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтори прийняли участь в обговоренні отриманих результатів.)
16. Lozin A. V., **Moiseenko V. E.**, Grigor'eva L. I., Kozulya M. M., Kulaga A. E., Lysoivan A. I., Mironov Y. K., Pavlichenko R. O., Romanov V. S., Chernyshenko V. Y. Chechkin and Uragan-3M Team (2013). Cleaning of inner vacuum surfaces in the Uragan-3M facility by radio-frequency discharges. *Plasma Physics Reports*, 39(8), 624-631. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: у роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні розрахунки, прийняв участь в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до

- опублікування. Співавтори прийняли участь у вимірюваннях параметрів плазми в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті.)
17. **Moiseenko V. E.**, Lozin A. V., Chechkin V. V., Chernyshenko V. Ya., Grigor'eva L. I., Kramskoi Ye. D., Korovin V. B., Kozulya M. M., Lyssoivan A. I., Schebetun A. V. Shapoval, A. N., Shtan' A. F., Solodovchenko S. I., Voitsenya V. S. and Garkusha I. E. (2014). VHF discharges for wall conditioning at the Uragan-2M torsatron. *Nuclear Fusion*, 54(3), 033009. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: у роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні розрахунки, прийняв участь в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтори прийняли участь у вимірюваннях параметрів плазми в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті.)
 18. **Moiseenko V. E.**, Kotenko V. G., Chernitskiy S. V., Nemov V. V., Ågren O., Noack K., Kalyuzhnyi V. N., Hagnestål A., Källne J., Voitsenya V. S., Garkusha I. E. (2014). Research on stellarator-mirror fission-fusion hybrid. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 56(9), 094008. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: у роботах здобувач зробив огляд поточного стану досліджень, додатково зробив аналітичні розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Усі співавтори прийняли участь в аналізі та обговоренні результатів.)
 19. **Moiseenko V. E.**, Nemov V. V., Ågren O., Kasilov S. V. & Garkusha I. E. (2016). Fast ion motion in the plasma part of a stellarator-mirror fission-fusion hybrid. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 58(6), 064005. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: у частині 2 роботи, яка увійшла до дисертації, розрахунки виконані здобувачем одноосібно. Для цих розрахунків співавтори надали карту магнітного поля Урагана-2М з одною відключеною котушкою тороїдального магнітного поля та прийняли участь в обговоренні результатів.)
 20. **Moiseenko V. E.**, Shapoval A. N., Lozin A. V., Nemov V. V., Kalyuzhnyj V. N., Kozulya M. M., Pavlichenko R. O., Kononov V. G., Kulaga A. E., Mironov Y. K. and Romanov V. S., Zamanov N. V., Bondarenko V. N, Kovtun Yu. V. and Garkusha I. E. (2019). Characteristics of regular discharges in Uragan-3M torsatron. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 61(6), 065006. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: у роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні розрахунки, прийняв участь в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтори прийняли участь у вимірюваннях параметрів плазми в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті.)

Наукові праці апробаційного характеру

21. **Moiseenko V. E., Ågren O.** (2006). Radio-Frequency Heating of Sloshing Ions in a Straight Field Line Mirror Field. In 9th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems. Takayama, Japan (November 9 - 11, 2005). *Preprint NIFS-PROC* (Vol. 63 p.109) National Institute for Fusion Science. (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні доповіді. Співавтор прийняв участь в обговоренні отриманих результатів.)
22. **Moiseenko V. E. & Ågren O.** (2006). Second harmonic heating of sloshing ions in a non-axisymmetric mirror. In *33rd EPS Conference on Plasma Physics 2006, EPS 2006* (pp. 1784-1787). (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні доповіді. Співавтор прийняв участь в обговоренні отриманих результатів.)
23. **Moiseenko V. E., Dreval N. B., Ågren O., Stepanov K. N., Burdakov A. V., Kalinin P. V. & Tereshin V. I.** (2007, September). Strong RF Heating in a Mirror During Plasma Build - up. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 933, No. 1, pp. 509-512). American Institute of Physics. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: у роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, прийняв участь у виводі рівнянь, запропонував алгоритм обчислень, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні доповіді. М.Б. Древаль прийняв участь у виводі рівнянь, написав числову програму, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні доповіді. Усі співавтори прийняли участь в обговоренні результатів.)
24. **Moiseenko V. E., Burchenko P. Ya., Chechkin V. V., Chernyshenko V. YA., Grigor'eva L. I., Hartmann D., Koch R., Konovalov V. G., Losin A. V., Lyssoivan A. I., Pashnev V. K., Shapoval A. N., Shvets O. M., Skibenko A. I., Stadnik Yu. S., Tereshin V. I., Voitsenya V. S., Volkov E. D.** Wall conditioning rf discharges in Uragan-2M torsatron. (2009) In *36th EPS Conference on Plasma Phys. Sofia. June 29 - July 3, 2009. ECA. 33E*, p-5.199. (Scopus) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні доповіді. Співавтори прийняли участь в обговоренні отриманих результатів.)
25. **Moiseenko V. E., Dreval M. B., Burchenko P. Ya., Losin A. V., Berezhnyj V. L., Bondarenko V. N., Chechkin V. V., Grigor'eva L. I., Hartmann D., Koch R., Konovalov V. G., Kotsubanov V. D., Kramskoi Ye. D., Kulaga A. E., Lyssoivan A. I., Mironov V. K., Pavlichenko R. O.,**

- Romanov V. S., Shapoval A. N., Skibenko A. I., Slavnyi A. S., Tereshin V. I., Voitsenya V. S. (2010) RF Heating Below Ion-Cyclotron Frequencies in Uragan Torsatrons. In *37th EPS Conference on Plasma Phys. Dublin, Ireland. June 21-25, 2010. ECA. 34A*, p-5.171. (Scopus) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні доповіді. Співавтори прийняли участь в обговоренні отриманих результатів.)
26. **Moiseenko V. E.** & Ågren O. (2012, June). Plasma heating and hot ion sustaining in mirror based hybrids. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1442, No. 1, pp. 199-207). American Institute of Physics. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні доповіді. Співавтори прийняли участь в обговоренні отриманих результатів.)
27. **Moiseenko V. E.**, Nemov V. V., Chernitskiy S. V., Ågren O., Shapoval A. N., Voitsenya V. S., Garkusha I. E. (2016) Stellarator-mirror fusion-fission hybrid systems. In *2nd International Conference on Fusion-Fission Subcritical Systems for Waste Management and Safety. C.R. ENEA Frascati, Italy. 26-28 Oct. 2016. Book of Proceedings*. p. 56. (Особистий внесок здобувача: У роботах здобувач зробив огляд поточного стану досліджень, додатково зробив аналітичні розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Усі співавтори прийняли участь в аналізі та обговоренні результатів.)

Публікації, що додатково відображають наукові результати дисертації:

28. **Moiseenko V. E.** (1999). Radio-frequency plasma production and heating below ion cyclotron frequency in stellarator. *Problems of Atomic Science and Technology, Series Plasma Physics*, 1(1, 2), p. 17-21. (Робота виконана здобувачем одноосібно.)
29. **Moiseenko V. E.** (2003). Modelling of Maxwell's equations using uniform finite elements. *Problems of Atomic Science and Technology, Series Plasma Physics*, 9(1), 82-84. (Робота виконана здобувачем одноосібно.)
30. **Moiseenko V. E.** (2002). Numerically stable modeling of radio frequency fields in plasma. *Problems of Atomic Science and Technology, Series Plasma Physics*, 4(7), 100-102. (Робота виконана здобувачем одноосібно.)
31. Moiseenko V. E. (2005). Penetration of electrostatic field through Faraday shield of ICRH strap antenna *Problems of Atomic Science and Technology, Series Plasma Physics*, 10(2), 35-37. (Робота виконана здобувачем одноосібно.)

32. **Moiseenko V. E.**, Wauters T., & Lysoivan A. (2016). Lower hybrid resonance: field structure and numerical modeling. *Problems of atomic science and technology, Series Plasma Physics*. 106(6), 44-47. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: в роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні та числові розрахунки, прийняв участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтори прийняли участь в обговоренні отриманих результатів.)
33. Lozin A. V., Kozulia M. M., Korovin V. B., Beletskii A. A., Glazunov G. P., Konotopskiy A. L., Baron D. I., **Moiseenko V. E.**, Grigor'eva L. I., Chechkin V. V., Shapoval, A. N., Makhov M. M., Konovalov V. G. (2018). Wall conditioning discharges driven by T-shaped antenna in Uragan-2M. *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*, 118(6), 50-53. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: у цій роботі запропонував Т-подібну антену, прийняв участь в аналізі результатів та написанні статті. Співавтори прийняли участь в експериментах, в аналізі результатів та вимірювали параметри плазми.)
34. **Moiseenko V. E.**, Beletskii A. A., Shapoval A. M., Wauters T., Gorjaev A., Brunner K. J., Buttenschön B, Drewelow P, Winters V, Brakel R, Dinklage A., Brezinsek S., Stange T., Laqua H., Lazersson S. and W7-X Team. (2019). A scenario of pulsed ECRH wall conditioning in hydrogen for the Wendelstein 7-X helias. *Problems of Atomic Science and Technology, Series: Plasma Physics* 119(1), 37-40. (Scopus, Web of Science) (Особистий внесок здобувача: У роботі здобувач запропонував ідею досліджень, постановку задачі, зробив аналітичні розрахунки, прийняв участь в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті, співпрацював з редакцією журналу при підготовці її до опублікування. Співавтори прийняли участь у вимірюваннях параметрів плазми в експериментах, в аналізі результатів та написанні статті.)

АНОТАЦІЯ

Моїсеєнко В. Є. «Високочастотні плазмові розряди в пробкотронах і стелараторах». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми. – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна. – Харків, 2021.

Розроблена низка нових чисельно стійких методів для рівнянь Максвелла: метод зважених нев'язок і модель у циліндричній геометрії, варіант методу шахової сітки для осесиметричних відкритих пасток, новітній метод скінченних різниць для двовимірно неоднорідної плазми. Представлені моделі на базі цих

методів. Розроблений оригінальний і ефективний метод для розрахунків із сильно осцилюючими розв'язками. Наведена методика застосування методу штрафів щодо шарів нижнього гібридного резонансу в холодній плазмі. Запропонована нова форма рівнянь Максвелла для числового моделювання.

Розраховані ефективні сценарії високочастотного нагрівання іонів, що плещуться, у відкритій пастці. Наданий детальний аналіз винайденого сценарію швидкого нагрівання плазми в пробкотроні під час її створення. Зроблене теоретичне дослідження проникнення електростатичного поля через Фарадеїв екран.

Експерименти на Урагані-3М продемонстрували успішність сценарію Альфвенова нагрівання з високими $k_{\parallel}$, який реалізований за допомогою компактної трьох-напіввиткової антени на фоні вад магнітної конфігурації Урагана-3М. Вперше впроваджено і досліджено високочастотний нагрівання плазми в Урагані-2М за допомогою колінчастовальної антени.

Запропоновані, впроваджені і досліджені нові сценарії високочастотної чистки внутрішніх вакуумних поверхонь у атмосфері водню на Урагані-2М та на Wendelstein7-X. Проведено детальне дослідження на Урагані-3М імпульсної високочастотної чистки в малому магнітному полі.

Розроблено оригінальну концепцію стелараторно-пробкотронного ядерно-термоядерного гібриду та зроблені оцінки щодо балансу енергії. Проведено моделювання щодо концепції стелараторно-пробкотронного гібриду з інжекцією нейтральних атомів. Результати розрахунків балансу потужності близькі до результатів, отриманих для системи з високочастотними нагріванням. Виконано дослідження руху швидких іонів, створених високочастотним нагріванням у стеларатор-пробкотронному режимі роботи Урагана-2М.

Ключові слова: високочастотне нагрівання плазми, рівняння Максвелла, метод Галеркіна, створення плазми, кондиціонування стінок, термоядерно-ядерний гібрид.

ABSTRACT

Moiseenko V. E. "Radio-frequency plasma discharges in fusion devices". - Qualifying scientific work in the form of manuscript.

The thesis on a scientific degree of the doctor of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.08 – plasma physics. – National Research Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology"; V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2021.

A new numerically stable method of weighted residuals and a model for Maxwell's equations in cylindrical geometry are developed, where all components of the electric field are represented by means of identical finite elements. It is more effective than Galerkin method when stiffness takes place in Maxwell's equations.

An original numerically stable model for the calculation of electromagnetic fields in the plasma of axisymmetric open traps without taking into account slow waves has been developed. It is implemented in the new upgraded PLFEM-S code, which differs in the possibility of numerically stable calculation of azimuthal-asymmetric modes.

The new method is proposed, and the model for calculation of electromagnetic fields in plasma of non-axisymmetric open traps without taking into account slow waves is developed. A new numerical model for calculating the distribution and absorption of radio frequency fields by sloshing ions (splashing ions).

An original and effective method for calculations with strongly oscillating solutions has been developed. It allows one to use a sparse grid and thereby significantly reduce computational costs.

Lower hybrid resonance in cold plasma leads to singular solutions of Maxwell's equations. The application of the penalty method allows one to bypass these difficulties without the large additional costs associated with the complexity of the calculation algorithm.

The comparative analysis of methods of radio-frequency heating of plasma in mirrors is given. Simulation of ion-cyclotron heating of sloshing ions in an open trap with straight lines of force was performed. For large traps, heating of the minority is effective in a wide range of minority concentrations and plasma densities. An efficient scenario of heating sloshing ions on the second cyclotron harmonic in an open trap with straight lines of force is substantiated and proposed. A detailed analysis of the invented scenario of rapid plasma heating during its creation in a mirror showed its significant efficiency. The calculations indicate its prospects for pulse modes of operation.

A theoretical study of the penetration of an electrostatic field through a Faraday screen of a half-turn antenna for the first time showed a significant advantage of a two-layer screen.

Experiments on the Uragan -3M demonstrated the success of the Alfven heating scenario with high $k_{\parallel}$, which was implemented using a compact three-half-turn antenna. The analysis of the features of discharges in the Uragan -3M torsatron showed the high efficiency of radio-frequency plasma heating together with defects in the magnetic configuration of the Uragan -3M. There are several options to change the configuration to make the area of the embedded magnetic surfaces wider. An inwardly shifted magnetic configuration is a promising choice in this regard.

Radio-frequency plasma heating was first introduced and studied in Uragan -2M. The new crankshaft antenna heats the plasma at frequencies below the ion-cyclotron frequency. The discharge supported by this antenna becomes "hot" for a few milliseconds, and then fades under a strong influx of impurities into the plasma.

The scenario of high-frequency cleaning of inner vacuum surfaces with the help of continuous VHF discharge, proposed, implemented and studied at Uragan -2M, showed a high cleaning speed. Numerical simulations indicate the insufficient suitability of the initially used loop antenna for VHF discharge: its load resistance is too small for good electrical matching. Instead of a frame, a T-shaped antenna was

proposed, which can be used during continuous cleaning of walls in toroidal magnetic traps.

The scenario of high-frequency cleaning of inner vacuum surfaces in the mode of ultrashort pulses of electron-cyclotron heating in a hydrogen atmosphere was introduced and studied on the Wendelstein7-X stellarator.

A detailed study of Uragan -3M pulsed high-frequency cleaning in a small magnetic field. The cleaning discharge with excitation of fast magnetosonic wave is convenient that it can be carried out, using the same antenna devices and RF generators which are used for creation and heating of plasma in working modes, and without any change of frequency of antenna and generator RF circuits.

An original concept of a stellarator-mirror nuclear-thermonuclear hybrid has been developed and estimates of energy balance have been made. Modeling was performed on the concept of stellarator-mirror hybrid with injection of neutral atoms. Injection of the neutral beam can be used to create a population of hot tritium ions in the mirror part of the stellarator- mirror thermonuclear-fission hybrid. The results of power balance calculations are close to the results obtained for a system with radio-frequency heating. The calculated thermonuclear Q is within the required range. Also, a study of the motion of fast ions created by high-frequency heating in the stellarator-mirror mode of Uragan -2M operation was performed.

Key words: radio-frequency plasma heating, Maxwell's equations, Galerkin method, plasma production, wall conditioning, fusion-fission hybrid.