

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

КУЛИК ЮЛІЯ СЕРГІЇВНА

УДК 533.9

**ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНОГО СТВОРЕННЯ
ПЛАЗМИ В СТЕЛАРАТОРАХ**

01.04.08-фізика плазми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті фізики плазми Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
МОІСЕЄНКО Володимир Євгенович,
Національний науковий центр
«Харківський фізико-технічний інститут»
НАН України, завідувач відділу стелараторів.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
ЛУЦЕНКО Вадим Васильович,
Інститут ядерних досліджень НАН України (м. Київ),
провідний науковий співробітник відділу теорії
ядерного синтезу

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
ЦЮЛКО В'ячеслав Володимирович,
Інститут фізики НАН України (м. Київ),
старший науковий співробітник відділу газової
електроніки

Захист відбудеться “15” березня 2024 р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, Безпечне середовище.

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

Автореферат розіслано “ ” лютого 2024 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої
ради Д 64.051.12



Андрій ГАХ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Еволюція людства та технічний прогрес безпосередньо пов'язані зі споживанням енергії. Частка вуглеводневих джерел (нафта, вуглець, природний газ) у всьому об'ємові спожитої енергії і нині є переважною. Проте природні копалини не лише поступово вичерпуються, величезною проблемою, пов'язаною з їх видобутком та використанням, є істотні викиди окислу вуглецю, що продукуються в процесі горіння, в атмосферу.

Використання відновлюваних джерел енергії (енергія сонця, вітру, припливів та відпливів, геотермальна енергія, біопаливо тощо) на поточний момент здатне лише дещо знизити залежність від викопного палива, проте не може повністю задовольнити енергетичні потреби через їх низьку концентрацію, залежність від зовнішніх чинників, адже вони мають змінний характер генерації та є потреба у резервних джерелах енергії.

Найбільш надійним і довгостроковим джерелом енергії видається ядерне паливо. Проте використання ядерної енергії призводить до значних проблем, пов'язаних із переробкою та зберіганням радіоактивного відпрацьованого ядерного палива, аваріями, що призводять до екологічних та техногенних катастроф.

Розвиток керованого термоядерного синтезу може стати вирішенням задачі отримання необхідних об'ємів енергії без шкідливих викидів в атмосферу парникових газів, адже основним побічним продуктом від виробництва стане цілком безпечний гелій. Паливом будуть слугувати ізотопи водню – дейтерій та тритій, який зазвичай виробляється з літію.

Токамаки та стеларатори призначені для здійснення процесів керованого термоядерного синтезу у високотемпературній плазмі. Створення плазми є ключовим елементом термоядерної технології.

У стелараторах першого покоління плазма створювалась за допомогою омичного нагріву, проте для досягнення термоядерної температури омичний нагрів виявився недостатнім. Для подальшого збільшення температури став необхідним додатковий нагрів плазми.

Доволі перспективними для створення та нагріву плазми в магнітних пастках для утримання високотемпературної плазми та, зокрема, у стелараторах видаються високочастотні методи, засновані на збудженні та поглинанні електромагнітних полів у плазмі. Високочастотний нагрів дозволяє підвищувати температуру плазми і в подальшому довести її до термоядерних значень.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному дослідженню високочастотного створення плазми у стелараторах за допомогою різноманітних антенних систем. Теоретичний аналіз створення плазми дозволяє сформулювати загальні вимоги для антенної системи, котра повинна бути придатною для створення плазми на всіх етапах. Щоб розробити оптимальну антенну систему для певного пристрою для утримання плазми, доречним є числове моделювання. Розглянутий у дисертації сценарій високочастотного розряду в короткоімпульсному режимі може бути використаний для чистки поверхонь стінок вакуумної камери, що також є важливим елементом робочого циклу термоядерних реакторів на основі стелараторних систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в Інституті фізики плазми Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України відповідно до планів науково-дослідних робіт і програм у межах наступних тем: Ш-3-11 (ІФП) (2016-2020). Дослідження високочастотного утворення та нагріву 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 (номер державної реєстрації 0116U006160); X-5-5 (2011-2013). 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 (номер державної реєстрації 0111U009604); П-3/22 (2014-2015). Експериментальне і теоретичне моделювання фізичних процесів у великих термоядерних установках з дивертором (номер державної реєстрації 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» (номер державної реєстрації 0113U006380); Ш-3-16 (ІФП) (2016-2020) Дослідження високочастотного утворення та нагріву плазми, що утримується у тороїдальних магнітних пастках стелараторного типу (номер державної реєстрації 0116U006160); 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; Проект Українського науково-технологічного центру (УНТЦ) №4216. Радіочастотне утворення і нагрів плазми в торсатроні Ураган-2М.

Мета і завдання дослідження. Основною метою роботи є вдосконалення фізичної картини процесу високочастотного створення плазми та отримання нових знань щодо цього процесу, включно зі створенням числової моделі, що описує процес створення плазми і використовується для моделювання даного процесу. Крім того, числове моделювання та числові розрахунки допомагають вибрати правильну стратегію експериментальних досліджень та запропонувати напрямок для майбутніх експериментів.

Для досягнення мети дисертаційної роботи було поставлено наступні завдання:

- Розробити числову модель для рівнянь Максвелла для стелараторних систем для атомарного газу.
- Дослідити фізичні особливості високочастотного створення плазми та провести числові експерименти з високочастотного створення плазми для стеларатора Ураган-2М з використанням колінчастовальної та рамкової антенних систем.

- Розробити самоузгоджену модель альвенівського створення плазми на частотах нижчих за іонну циклотронну для стелараторних систем для атомарного газу.
- Провести числові експерименти з високочастотного створення плазми для стеларатора Ураган-2М з використанням рамкової та чотиринапіввиткової антенних систем.
- Дослідити фізичні особливості високочастотного створення плазми і розробити теоретичну модель створення плазми для стелараторних систем для молекулярного водню.
- Провести числові експерименти з високочастотного створення плазми для стеларатора великого розміру з використанням подвійної рамкової антени.
- Розробити модель альвенівського та електронного циклотронного створення плазми для стелараторних систем для молекулярного газу.
- Провести моделювання високочастотного створення плазми та виконати числовий аналіз плазмового розряду для чистки стінок вакуумної камери у стелараторі Wendelstein 7-X.

Об'єкт дослідження: плазма стелараторів з неповною іонізацією в електромагнітних полях.

Предмет дослідження: процес високочастотного створення плазми в стелараторах.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі застосовано відомі аналітичні та числові методи. При розробці моделі для числового розв'язання рівнянь Максвелла у циліндричній геометрії використано метод скінченних елементів в чисельно-стійких версіях. Для отримання числових розв'язків, розв'язання лінійних рівнянь використано LU-метод розкладання матриць. Для моделювання еволюції параметрів плазми застосовано метод Кранка-Ніколсона, який є абсолютно чисельно стійким. Для досягнення другого порядку точності за часом було проведено уточнення отриманих розв'язків по схемі Рунге-Кутта другого порядку. Для написання числового коду використано мову програмування Фортран 90. Всі методи, що використані у дисертації, є надійними та перевіреними.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі вперше отримано наступні результати:

- Розроблено одновимірну числову модель для рівнянь Максвелла у циліндричній геометрії для стелараторних систем для атомарного газу.
- Досліджено фізичні особливості високочастотного створення плазми та проведено числові експерименти з високочастотного створення плазми для стеларатора Ураган-2М з використанням колінчастовальної та рамкової антенних систем.
- Розроблено самоузгоджену модель високочастотного створення плазми для стелараторних систем для атомарного газу.

- Виконано числове моделювання високочастотного створення плазми для стеларатора Ураган-2М з використанням рамкової та чотиринапіввиткової антенних систем за допомогою вдосконаленої моделі для атомарного газу.
- Досліджено фізичні особливості високочастотного створення плазми і розроблено теоретичну модель створення плазми для стелараторних систем для молекулярного водню.
- Проведено числові експерименти з високочастотного створення плазми для стеларатора великого розміру з використанням подвійної рамкової антени за допомогою моделі для молекулярного водню.
- Розроблено модель альвенівського та електронного циклотронного створення плазми для стелараторних систем для молекулярного газу.
- Проведено моделювання високочастотного створення плазми та виконано числовий аналіз плазмового розряду для чистки стінок вакуумної камери у стелараторі Wendelstein 7-X.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані в дисертаційній роботі результати роблять внесок у розвиток фізичної картини високочастотних плазмових розрядів, методів високочастотного створення плазми в магнітних пастках стелараторного типу. Результати числового моделювання є корисними щодо вибору режимів для чистки стінок вакуумної камери стелараторів високочастотними розрядами.

Усі проведені дослідження мають практичне значення, а саме:

- Розроблені числові моделі було використано для розрахунків щодо моделювання процесів створення плазми у стелараторах Ураган-2М (Інститут фізики плазми ННЦ ХФТІ, Харків, Україна) та Wendelstein 7-X (Інститут фізики плазми імені Макса Планка, Грайфсвальд, Німеччина).
- Розроблені числові моделі використовують під час дослідження нових сценаріїв створення плазми та під час підготовки експериментів на стелараторах Ураган-2М та Wendelstein 7-X.
- Елементи числового коду використовують у коді TOMATOR-1D (Лабораторія фізики плазми Королівської військової академії, Брюссель, Бельгія).

Загалом, представлені результати мають практичне значення для усіх стелараторних систем, адже розглянуті сценарії є експериментально перевірені на малих магнітних пастках стелараторного типу і можуть бути використані для великих систем реакторних масштабів.

Публікації. Результати дисертаційної роботи повністю відображено у 23 наукових працях, у тому числі в 4 статтях у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science [1-4], 3 публікаціях у зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science [5-7], 4 статтях у виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science [8-11] та 12 матеріалах і тезах доповідей на наукових конференціях [12-23].

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати, що винесено на захист, отримані за безпосередньої участі здобувачки.

У роботах [1, 2, 4, 5, 7-11] здобувачка приймала визначальну участь у розробці теоретичних моделей, виводі рівнянь, написанні комп'ютерних кодів на основі розроблених моделей. Здобувачка здійснювала розробку тестів для перевірки коректності роботи кодів і проводила тестування усіх структурних елементів числових кодів. З використанням кодів авторка виконувала числові розрахунки. Приймала участь в обговоренні та аналізі отриманих результатів. Приймала участь у написанні статей та підготовці їх до опублікування.

У роботі [3] здобувачка приймала участь в оптимізації високочастотного модуля для числового коду, в обговоренні та аналізі отриманих результатів та написанні статті, співпрацювала з редакцією журналу під час підготовки її до опублікування.

У роботі [6] здобувачка приймала участь у розробці теоретичної моделі, виводі рівнянь, написанні числового коду. Проводила тестування коду, виконувала числові розрахунки. Приймала активну участь в обговоренні та аналізі отриманих результатів, написанні статті. Необхідно відмітити, що в даній дисертації використано лише розділ 3 роботи [6].

У роботах [12-23] здобувачка приймала визначальну участь у розробці теоретичних моделей, виводі рівнянь, написанні числових кодів та їх тестуванні. Виконувала числові розрахунки. Приймала активну участь в обговоренні та аналізі отриманих результатів. Готувала доповіді на конференції.

Апробація результатів дисертації. Результати, що увійшли до дисертаційної роботи, були представлені на наступних конференціях: 11-th International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion and 2-nd Alushta International Workshop on the Role of Electric Fields in Plasma Confinement in Stellarators and Tokamaks (Alushta (Crimea), Ukraine, 2006); 17th Topical Conference on Radio-Frequency Power in Plasma (Clearwater, Florida, USA, 2007); 34th EPS Conference on Plasma Physics (Warsaw, Poland, 2007); International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion and 4-th Alushta International Workshop on the Role of Electric Fields in Plasma Confinement in Stellarators and Tokamaks (Alushta (Crimea), Ukraine, 2010); International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop Nano- and micro-sized structures in plasmas (Alushta (Crimea), Ukraine, 2012); Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (Київ, Україна, 2013); International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop Nano- and micro-sized structures in plasmas (Kharkiv, Ukraine, 2014); Eighth IAEA Technical Meeting on “Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices” (Nara, Japan, 2015); International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kharkiv, Ukraine, 2016); International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kharkiv, Ukraine, 2018); Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (Київ, Україна, 2021).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатку. Загальний обсяг дисертації становить 166 сторінок, з яких основний текст – 118 сторінок. Робота містить 61 рисунок та 1 таблицю. Список використаних джерел налічує 117 найменувань на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У дисертаційній роботі представлено розроблені числові моделі для теоретичних досліджень високочастотного створення плазми в магнітних пастках стелараторного типу та результати числових розрахунків з високочастотного створення плазми у стелараторах Ураган-2М, Україна та Wendelstein 7-X, Німеччина, отримані за допомогою цих моделей.

У **вступі** обґрунтовано важливість та актуальність теми дисертаційної роботи і досліджень з високочастотного створення плазми в магнітних пастках стелараторного типу, сформульовано мету та основні завдання роботи, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами й темами, які проводять в Інституті фізики плазми ННЦ ХФТІ, наведено дані про наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, визначено особистий внесок здобувачки в наукових працях, надано відомості про апробацію результатів роботи та публікації за темою дисертації.

У **першому** розділі коротко описано найбільш поширені методи високочастотного створення плазми в магнітних пастках стелараторного типу, а саме створення плазми в електронному циклотронному та іонному циклотронному діапазонах частот. Описано фізичні процеси, що відбуваються під час створення плазми.

Представлено нову якісну методику аналізу ефективності створення плазми високочастотними полями в іонному циклотронному діапазоні частот за допомогою антенних систем, в межах якої необхідне лише розв'язання рівнянь Максвелла. Щодо числової моделі, проведено моделювання антенної системи зовнішніми високочастотними струмами на прикладі антени колінчастовального типу (Рис. 1). Для дискретизації використано нещодавно розроблений метод числового розв'язання рівнянь Максвелла – метод однорідних скінченних елементів. Для реалізації даної методики було написано числовий код, який розв'язує рівняння Максвелла в циліндричній геометрії.

За допомогою розробленого числового коду проведено якісний аналіз характеру процесу високочастотного створення плазми на частоті нижчій за іонну циклотронну для стеларатора Ураган-2М за допомогою антенних систем колінчастовального та рамкового типів (див. Рис. 1, 2). Наведено обговорення отриманих результатів числових експериментів.

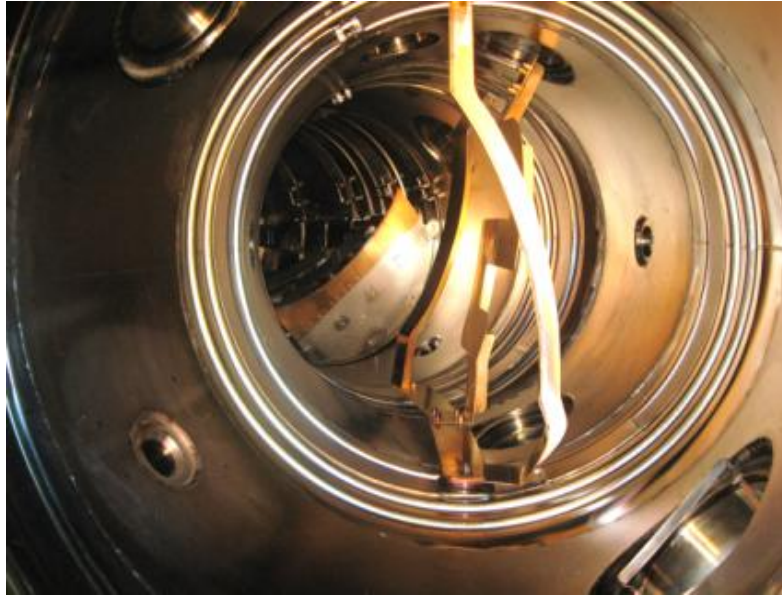


Рис. 1 Колінчастовальна антена в стелараторі Ураган-2М

Числові розрахунки показали, що антена колінчастовального типу забезпечує прийнятний енерговнесок за низьких та високих значень густини плазми. Мінімальний енерговнесок спостерігається у проміжку $10^{10} \text{ см}^{-3} < n_{e0} < 10^{11} \text{ см}^{-3}$, що робить дану стадію створення плазми критичною. Колінчастовальна антена може використовуватися для створення густої плазми $n_{e0} \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Проте поріг потужності для цієї антени, який визначений критичною стадією, є високим. Результати числових експериментів продемонстрували здатність антени колінчастовального типу створювати плазму з густиною $n_{e0} \sim 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

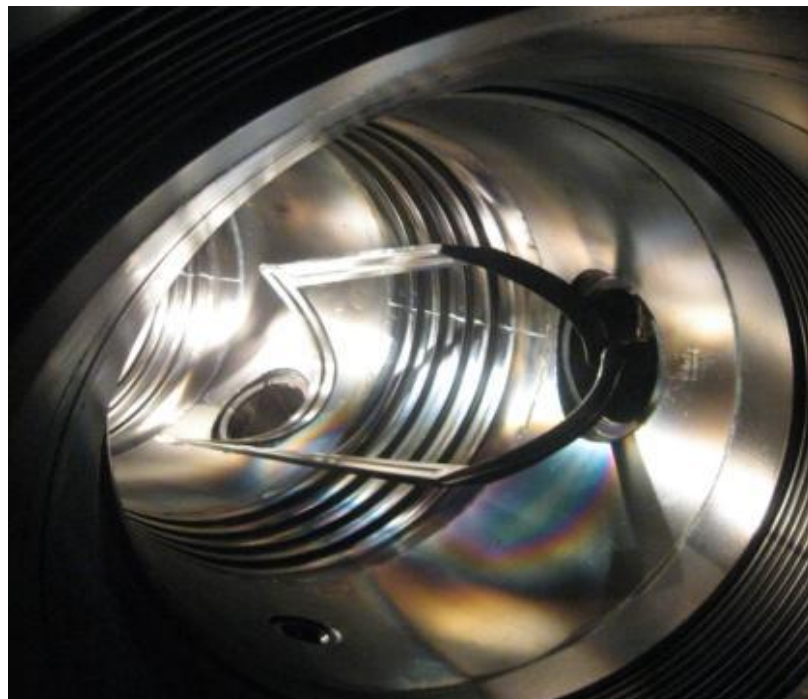


Рис. 2 Рамкова антена в стелараторі Ураган-2М

Числові розрахунки для антени рамкового типу показали високу ефективність такої антени для створення плазми низької густини. Починаючи з густини плазми $n_{e0} \sim 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, енерговнесок зміщується на периферію плазми і цього не можна уникнути, змінюючи розміри антени або інші параметри. З цієї причини густина плазми, яку можна отримати за допомогою рамкової антени, є низькою, що підтверджено першими експериментами на стелараторі Ураган-2М. Антена рамкового типу може бути використана, якщо після високочастотного імпульсу цієї антени подальше збільшення плазмової густини $n_{e0} \sim (1-3) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ буде забезпечуватися в іншому режимі, наприклад, високочастотним нагрівом за допомогою чотиринапіввиткової антени.

У другому розділі представлено нову самоузгоджену одновимірну модель для високочастотного створення плазми в іонному циклотронному діапазоні частот, що дозволяє моделювати даний процес з урахуванням радіальних неоднорідностей густини плазми і її температури та їх впливові на розподіл високочастотних полів у плазмовому стовпі. Розроблена самоузгоджена модель включає в себе систему рівнянь балансу частинок і енергії та крайову задачу для рівнянь Максвелла. У моделі вбудовано неокласичну дифузію та враховано основні елементарні процеси взаємодії плазми з нейтральним газом. Розрахунок у кожен момент часу фактично тривимірної крайової задачі для рівнянь Максвелла дозволяє врахувати особливості антенної системи, зміну внесеного опору антени в часі, вплив цього опору на величину внесеної високочастотної потужності та дозволяє отримати динаміку зміни радіального профілю введеної високочастотної потужності.

З використанням нової самоузгодженої моделі проведено числові експерименти з високочастотного створення плазми в стелараторі Ураган-2М на частотах нижчих за іонну циклотронну за допомогою антени рамкового типу. Числові розрахунки показали, що повільна хвиля, збуджувана антеною, сильно поглинається на периферії плазмового стовпа і частка потужності, що йде в об'єм утримання, виявляється малою. У результаті, температура плазми в центрі плазмового стовпа залишається низькою, в той час, як на периферії плазми температура є значно вищою. У зв'язку з цим, на периферії має місце сильне поглинання енергії високочастотного поля за механізмом Ландау.

Представлено результати числових експериментів зі створення плазми в стелараторі Ураган-2М за допомогою чотиринапіввиткової антени. У розрахунках знайдено режими успішного створення плазми, в яких нейтральний газ згоряє повністю і формується гострий профіль густини плазми з максимумом на геометричній осі.

Також проведено числові дослідження здатності чотиринапіввиткової антени підвищувати густина плазми у стелараторі Ураган-2М. Числові розрахунки показали, що чотиринапіввиткова антена здатна підвищувати густина плазми, якщо початкова густина плазми є вищою за певне порогове значення (знайдене в розрахунках порогове значення дорівнювало $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$). За допомогою такої антени густина плазми може бути збільшена на порядок величини. У досліджуваному випадку, рамкова антена створювала частково іонізовану плазму з

густиною, яку вона спроможна створити, а чотиринапіввиткова антена підвищувала густину плазми і забезпечувала повну іонізацію нейтрального газу. Для вибраних параметрів розряду оптимальне значення початкової густини нейтральних атомів складає $n_0 = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Запропоновано та досліджено сценарій високочастотного розряду в імпульсному режимі. Досліджений у даному розділі високочастотний розряд застосовується для створення нейтральних атомів, які використовуються для чистки поверхонь стінок вакуумної камери магнітних пасток. Такий високочастотний розряд може бути ініційований у магнітному полі, що є перевагою для машин з надпровідними магнітами. Проведено оптимізацію чистячого розряду (підбір параметрів розряду для генерації атомарного водню) для стеларатора великого розміру. Для даного сценарію використано подвійну рамкову антену, яка збуджує повільну хвилю з пригніченим збудженням довгохвильових мод. У розрахунках атоми формуються в основному за рахунок дисоціації молекул водню електронним ударом. В проміжках між імпульсами, коли високочастотний нагрів вимкнений, зростає роль дисоціативної рекомбінації молекулярних іонів з електронами, яка є додатковим джерелом атомарного водню. Числові розрахунки показали, що за рахунок рекомбінації у розглянутому сценарії може вироблятися 10^{20} атомів водню за секунду.

У **третьому** розділі представлено оновлену молекулярну модель високочастотного створення плазми в системах стелараторного типу, що включає всі процеси зіткнень, є дієвою на всіх стадіях створення плазми в стелараторі та може працювати, як у випадку іонного циклотронного нагріву плазми, так і електронного циклотронного. Дану модель використано для опису процесу високочастотного створення плазми, а також для числового аналізу плазмового розряду для чистки стінок вакуумної камери в магнітних пастках стелараторного типу.

Представлена числова модель, як і попередні моделі, включає в себе систему рівнянь балансу частинок і енергії для електронів, пов'язану з крайовою задачею для рівнянь Максвелла. Новою особливістю даної числової моделі є врахування молекул нейтрального газу та молекулярних іонів H_2^+ , H_3^+ у рівняннях балансу частинок і можливість моделювання іонного циклотронного пробою. Передбачається, що нейтральний газ складається з молекулярного і атомарного водню.

Описано розроблений на основі нової самоузгодженої моделі одновимірний числовий код RFPP-St2.

Представлено результати числового моделювання короткоімпульсних електронних циклотронних чистячих розрядів у стелараторі Wendelstein 7-X за допомогою оновленої теоретичної моделі.

Показано порівняння часової еволюції просторово усередненої електронної густини з експериментальними даними для тримілісекундного електронного циклотронного імпульсу. З певною точністю розрахунки відтворюють експериментальний імпульс на стелараторі Wendelstein 7-X (див. Рис. 3). Незначну різницю між експериментальними даними та результатами числового моделювання

можна пояснити тим, що в експерименті виробляється деяка кількість швидких електронів. Присутність цих електронів викликає подальшу іонізацію. Числова модель такі електрони не враховує.

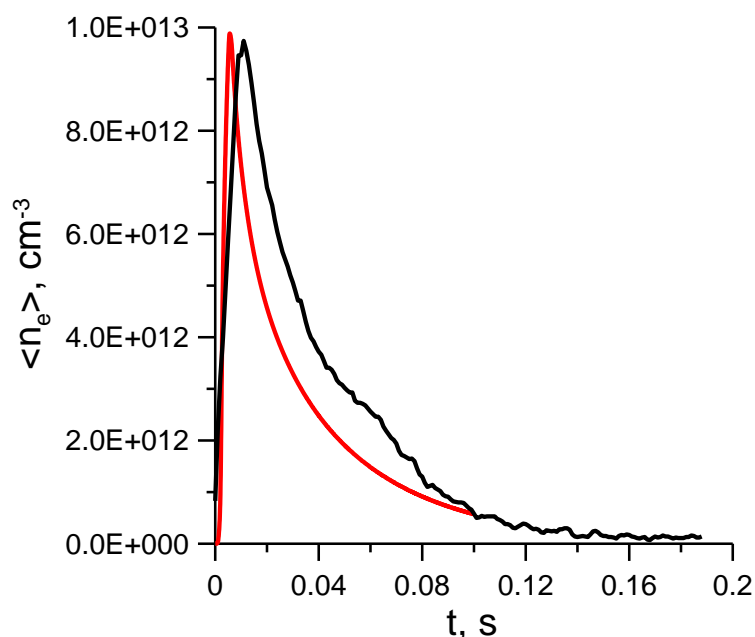


Рис. 3 Еволюція у часі просторово усередненої електронної густини для електронних циклотронних розрядів у Wendelstein 7-X (чорна крива – експериментальні дані, червона – дані числового експерименту)

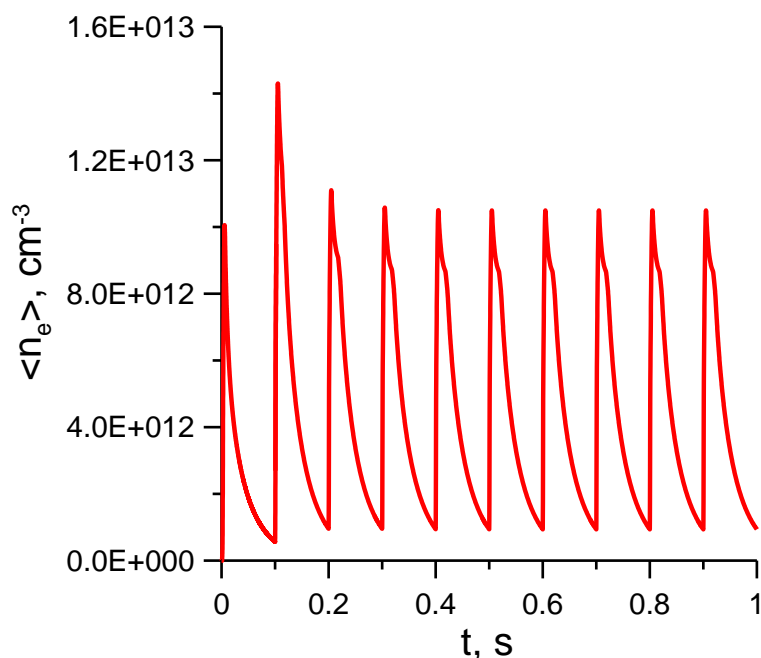


Рис. 4 Еволюція у часі просторово усередненої електронної густини для серії імпульсів для електронних циклотронних розрядів у Wendelstein 7-X (період ЕЦ імпульсів 0.1 с)

Призначення таких тримілісекундних імпульсів полягає у створенні атомів водню та їх використанні для чистки стінок вакуумної камери тороїдальних

магнітних пасток. Для забезпечення безперервності генерації атомарного водню необхідно використовувати серію імпульсів. Результат моделювання багатоімпульсного періодичного режиму наведено на рисунках 4 та 5. У даних числових експериментах параметри імпульсів у серії є однаковими. Генерувались імпульси з періодом 0.1 с.

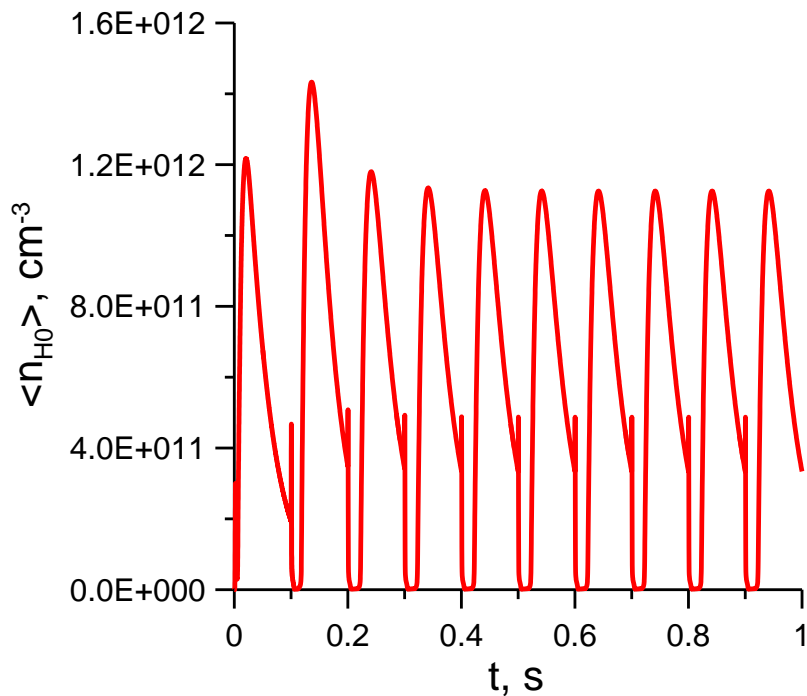


Рис. 5 Еволюція в часі просторово усередненої густини H_0 для серії імпульсів для електронних циклотронних розрядів у Wendelstein 7-X (період ЕЦ імпульсів 0.1 с)

На початку серії імпульси густини плазми та густини нейтральних атомів мають різну амплітуду, та з часом процес стає періодичним. Густина згенерованих нейтральних атомів є достатньою для ефективної чистки стінок вакуумної камери. Проведені розрахунки можуть слугувати основою для практичного сценарію для стеларатора Wendelstein 7-X.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено розроблені числові моделі для дослідження високочастотного створення плазми в магнітних пастках стелараторного типу та результати теоретичних розрахунків з високочастотного створення плазми на стелараторах Ураган-2М, Україна та Wendelstein 7-X, Німеччина, отримані за допомогою цих моделей.

1. Розроблено нову якісну методику аналізу ефективності створення плазми високочастотними полями в альвенівському діапазоні частот за допомогою антенних систем, в межах якої необхідне лише розв'язання крайової задачі для

рівнянь Максвелла. Розрахунки в рамках цієї методики показали, що антена рамкового типу може бути використана для створення плазми низької густини, а антена колінчастовального типу забезпечує прийнятний енерговнесок у доволі широкому діапазоні густин плазми.

2. Розроблено самоузгоджену числову модель для високочастотного створення плазми в альвенівському діапазоні частот, що дозволяє моделювати еволюцію розподілу густини і температури електронів плазми, зумовлену високочастотним нагрівом. Розрахунки зі створення плазми за допомогою рамкової антени Урагану-2М показали, що повільна хвиля, збуджувана антеною, сильно поглинається на периферії плазмового стовпа і частка потужності, яка надходить до об'єму утримання плазми, виявляється малою, що є причиною створення плазми з низькою густиною. Знайдено режим з використанням чотиринапіввиткової антени, в якому можна суттєво підвищити густину плазми, створеної рамковою антеною.

3. Запропоновано і досліджено сценарій високочастотного розряду в імпульсному режимі. Такий розряд застосовується для створення нейтральних атомів у плазмі з неповною іонізацією, що потрібні для чистки поверхонь стінок вакуумної камери. Проведено оптимізацію чистячого розряду (підбір параметрів розряду для генерації атомарного водню) для стеларатора великого розміру. Для даного сценарію було використано подвійну рамкову антену, яка збуджує повільну хвилю з пригніченим збудженням довгохвильових мод.

4. Проведено числове моделювання короткоімпульсного розряду для електронного циклотронного нагріву плазми. Для даного дослідження розроблено молекулярну модель, яка містить всі процеси зіткнень і є дієвою на всіх стадіях створення плазми в стелараторах. З певною точністю розрахунки відтворюють експериментальний імпульс на стелараторі Wendelstein 7-X. Також проведено числове моделювання багатоімпульсного періодичного режиму. Числові розрахунки показали, що цей режим може слугувати основою для сценарію чистки стінок вакуумної камери Wendelstein 7-X високочастотними розрядами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Moiseenko, V.E., **Stadnik, Yu.S.**, Lysoivan, A.I. (2012) Self-Consistent Modelling of Plasma Density Increase with Radio-Frequency Heating. *Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Plasma Physics* **6** (82), pp. 46-48. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, написання статті). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).

2. **Kulyk, Yu.S.**, Moiseenko, V.E., Wauters, T., Lysoivan, A.I. (2014) Numerical Modelling of Plasma Production with Radio-Frequency Heating Using Four-Strap π -Phased Antenna. *Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Plasma Physics* **6** (94), pp. 30-33. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, написання статті). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).
3. Moiseenko, V.E., **Kulyk, Yu.S.**, Wauters, T., Lysoivan, A.I. (2015) Optimization of Self-Consistent Code for Modelling of RF Plasma Production. *Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Plasma Physics* **1** (21), pp. 56-58. (Особистий внесок здобувачки: участь у роботі з оптимізації високочастотного модуля для числового коду, участь в тестуванні, аналізі отриманих результатів, написання статті). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).
4. **Kulyk, Yu.S.**, Moiseenko, V.E., Wauters, T., Lysoivan, A.I. (2021) Modelling of Radio-Frequency Wall Conditioning in Short Pulses in a Stellarator. *Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Plasma Physics* **1** (131), pp. 9-14. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, написання статті). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).

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

5. Moiseenko, V.E., **Stadnik, Yu.S.**, Stepanov, K.N., Shvets, O.M., Volkov, E.D., Tereshin, V.I (2007) RF Plasma Production in Uragan-2M Torsatron. *AIP Conference Proceedings* **933**, pp. 115-118. American Institute of Physics. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, написання статті). (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).
6. 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. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі,

написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків та написанні статті. Необхідно зазначити, що в цій дисертації використано лише розділ 3 роботи). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).

7. Moiseenko, V.E., **Stadnik, Yu.S.**, Lysoivan, A.I., Korovin, V.B. (2013) Self-Consistent Modeling of Radio-Frequency Plasma Generation in Stellarators. *Plasma Physics Reports* **39** (11), pp. 873–881. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, написання статті). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).

Наукові праці в виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

8. Moiseenko, V.E., **Stadnik, Yu.S.**, Volkov, E.D., Svets, O.M. (2006) Numerical Modelling of RF Plasma Production in Uragan-2M Stellarator with Crankshaft Antenna. *Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Plasma Physics* **6** (12), pp. 62-64. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, написання статті). (Входить до міжнародної наукометричної бази Web of Science).
9. Moiseenko, V.E., **Stadnik, Yu.S.**, Lysoivan, A.I., Dreval, M.B. (2010) Self-consistent Model of the RF Plasma Production in Stellarator. *Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Plasma Physics* **6** (16), pp. 21-23. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, написання статті). (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).
10. **Kulyk, Yu.S.**, Moiseenko, V.E., Wauters, T., Lysoivan, A.I. (2016) Radio-Frequency Wall Conditioning for Steady-State Stellarators. *Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Plasma Physics* **6** (106), pp. 56-59. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, написання статті). (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).
11. **Kulyk, Yu.S.**, Moiseenko, V.E., Wauters, T., Lysoivan, A.I. (2018) A Numerical Model of Radio-Frequency Wall Conditioning for Steady-State Stellarators. *Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Plasma Physics* **6** (118), pp. 46-49. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових

розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, написання статті). (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).

Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:

12. Moiseenko, V.E., **Stadnik, Yu.S.**, Volkov, E.D., Shvets, O.M. (2006) Numerical Modelling of RF Plasma Production in Uragan-2M Stellarator with Crankshaft Antenna. In *11-th International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion and 2-nd Alushta International Workshop on the Role of Electric Fields in Plasma Confinement in Stellarators and Tokamaks*. Alushta (Crimea), Ukraine, 11-16 September 2006. Book of Abstracts, p. 57. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, підготовка доповіді).
13. Moiseenko, V.E., **Stadnik, Yu.S.**, Stepanov, K.N., Shvets, O.M., Volkov, E.D., Tereshin, V.I. (2007) RF Plasma Production in Uragan-2M Torsatron. In *17th Topical Conference on Radio-Frequency Power in Plasma*, Clearwater, Florida, USA, 7-9 May 2007, paper b41. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, підготовка доповіді). (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science).
14. **Stadnik, Yu.S.**, Moiseenko, V.E., Stepanov, K.N., Shvets, O.M., Volkov, E.D., Tereshin, V.I. (2007) Theoretical Analysis of RF Plasma Production in Uragan-2M Torsatron. In *34th EPS Conference on Plasma Phys.* Warsaw, Poland, 2-6 July 2007. ECA Vol.31F, P-4.157. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, підготовка доповіді). (Входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).
15. Moiseenko, V.E., **Stadnik, Yu.S.**, Lysoivan, A.I., Dreval, M.D. (2010) Self-Consistent Model of the RF Plasma Production in Stellarator. In *International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion and 4-th Alushta International Workshop on the Role of Electric Fields in Plasma Confinement in Stellarators and Tokamaks*. Alushta (Crimea), Ukraine, 13-18 September 2010. Book of Abstracts, p. 52. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, підготовка доповіді).
16. Moiseenko, V.E., **Stadnik, Yu.S.**, Lysoivan, A.I. (2012) Self-Consistent Modelling of Plasma Density Increase with Radio-Frequency Heating. In *International*

Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop Nano- and micro-sized structures in plasmas. Alushta (Crimea), Ukraine, 17-22 September 2012. Book of Abstracts, p. 61. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, підготовка доповіді).

17. Моїсеєнко, В.Є., **Кулик, Ю.С.**, Лисойван, А.І. (2013) Самоузгоджене моделювання накопичення плазми за допомогою високочастотного нагріву. In *Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу 2013*. Київ, 24-25 вересня 2013. Тези доповідей, с. 20. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, підготовка доповіді).
18. Moiseenko, V.E., **Kulyk, Yu.S.**, Wauters, T., Lysoivan, A.I. (2014) Numerical Modelling of Plasma Production with Radio-Frequency Heating Using Four-Strap π -Phased Antenna. In *International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop Nano- and micro-sized structures in plasmas*. Kharkiv, Ukraine, 15-18 September 2014. Book of Abstracts, p. 50. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, підготовка доповіді).
19. Moiseenko, V.E., **Kulyk, Yu.S.**, Wauters, T., Lysoivan, A.I. (2014) Optimization of Self-Consistent Code for Modelling of RF Plasma Production. In *International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop Nano- and micro-sized structures in plasmas*. Kharkiv, Ukraine, 15-18 September 2014. Book of Abstracts, p. 51. (Особистий внесок здобувачки: участь у роботі з оптимізації високочастотного модуля для числового коду, тестуванні комп'ютерного коду, участь в обробці та аналізі результатів розрахунків, підготовка доповіді).
20. **Kulyk, Yu.S.**, Moiseenko, V.E., Wauters, T., Lysoivan, A.I. (2015) Radio-Frequency Wall Conditioning for Steady-State Stellarators. In *Eighth IAEA Technical Meeting on "Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices*. Nara, Japan, 24-30 May 2015. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, підготовка доповіді).
21. **Kulyk, Yu.S.**, Moiseenko, V.E., Wauters, T., Lysoivan, A.I. (2016) Radio-Frequency Wall Conditioning for Steady-State Stellarators. In *International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion*. Kharkiv, Ukraine, 12-15 September 2016. Book of Abstracts, p. 55. (Особистий внесок здобувачки:

участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, підготовка доповіді).

22. **Kulyk, Yu.S.**, Moiseenko, V.E., Wauters, T., Lyssoivan, A.I. (2018) A Numerical Model of Radio-Frequency Wall Conditioning for Steady-State Stellarators. In *International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion*. Kharkiv, Ukraine, 10-13 September 2018. Book of Abstracts, p. 33. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці теоретичної моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, підготовка доповіді).
23. **Кулик, Ю.С.**, Моїсеєнко, В.Є., Вотерс, Т., Лисойван, А.І. (2021) Моделювання високочастотного короткоімпульсного розряду в стелараторі. In *Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу 2021*. Київ, 15-16 грудня 2021. Тези доповідей, с. 19, O.We.8 онлайн. (Особистий внесок здобувачки: участь у розробці числової моделі, написанні та тестуванні комп'ютерного коду, виконання числових розрахунків, обробка результатів розрахунків, участь в аналізі результатів розрахунків, підготовка доповіді).

АНОТАЦІЯ

Кулик Ю.С. Числове моделювання високочастотного створення плазми в стелараторах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми. – Інститут фізики плазми Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, – Харків, 2024.

У дисертації представлено нову якісну методику аналізу ефективності створення плазми ВЧ полями в іонному циклотронному діапазоні частот за допомогою антенних систем, в межах якої необхідне лише розв'язання крайової задачі для рівнянь Максвелла. За допомогою цієї методики проведено теоретичні дослідження ВЧ створення плазми у стелараторі У-2М.

Розроблено самоузгоджену модель для ВЧ створення плазми, що дозволяє моделювати еволюцію профілю густини і температури електронів плазми, зумовлену впливом ВЧ полів разом із вигорянням нейтрального газу. За допомогою цієї моделі проведено розрахунки з ВЧ створення плазми у стелараторі У-2М для рамкової та чотиринапіввиткової антенних систем. Також проведено теоретичні дослідження здатності чотиринапіввиткової антени підвищувати густину плазми у стелараторі У-2М.

Розглянуто сценарій чистячого ВЧ розряду в короткоімпульсному режимі. Для вивчення розряду використовувався оновлений самоузгоджений одновимірний числовий код, за допомогою якого проведено оптимізацію чистячого розряду для стеларатора великого розміру.

Представлено результати числового моделювання короткоімпульсного розряду для електронного циклотронного нагріву плазми. Для даного дослідження розроблено молекулярну модель, що містить всі процеси зіткнень і є дієвою на всіх стадіях створення плазми у стелараторі. За допомогою даної моделі проведено числові розрахунки для одиночних імпульсів, а також досліджено багатоімпульсний періодичний режим для стеларатора W7-X.

Ключові слова: ВЧ створення плазми, стеларатор, рівняння Максвелла, рамкова антена, чотиринапіввиткова антена.

ABSTRACT

Kulyk Yu.S. Numerical modelling of the radio-frequency plasma production in stellarators. – Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Physics and Mathematics, Specialty 01.04.08 – Plasma Physics. – National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology» Institute of Plasma Physics. – V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, – Kharkiv, 2024.

The thesis presents the developed numerical models for theoretical studies of radio-frequency plasma production in stellarator-type machines and the results of numerical calculations on RF plasma production in the Uragan-2M, Ukraine, and the Wendelstein 7-X, Germany, stellarators obtained with the help of these models.

A qualitative technique for analyzing the efficiency of plasma production by high-frequency fields in the ion cyclotron range of frequencies using antenna systems within which only the solution of the boundary value problem for Maxwell's equations is required was presented. A numerical code for solving Maxwell's equations in cylindrical geometry was developed to implement this technique. This code was used to conduct a qualitative analysis of the nature of the plasma production process in stellarator-type machines using various antenna systems. Theoretical studies of RF plasma production in the Uragan-2M stellarator were carried out using frame and crankshaft antenna systems.

A new self-consistent numerical model for radio-frequency plasma production in the ion cyclotron range of frequencies, which allows simulating the evolution of the density and temperature profiles of plasma electrons due to the influence of radio-frequency fields together with neutral gas burnout, was developed. This model incorporates neoclassical diffusion and takes into account the basic elementary processes of plasma interaction with neutral gas.

This model is implemented in a new numerical code, which is used to calculate the radio-frequency plasma production in the Uragan-2M stellarator at frequencies lower than the ion cyclotron frequency for frame-type and four-strap antenna systems.

Theoretical studies of the ability of the four-strap antenna to increase the plasma density in the Uragan-2M stellarator were also conducted. Numerical calculations showed that this antenna needs target plasma. Still, further on, the plasma density can be increased by an order of magnitude with the help of the four-strap antenna.

The scenario of a radio-frequency discharge in the short-pulse mode is considered. Such a discharge is used to create neutral atoms, which are used to clean the surfaces of

the walls of the vacuum chamber. Plasma production in the ion cyclotron range of frequencies is a possible way to maintain a cleaning discharge in stellarators.

To study such a discharge, an updated self-consistent one-dimensional numerical code simulating high-frequency plasma production in stellarator-type machines in the ion cyclotron range of frequencies was used. The updated model is a model for molecular hydrogen and can be used when the plasma density is small. Using the developed numerical code, optimization of the cleaning discharge (selection of discharge parameters for the generation of atomic hydrogen) was carried out for a large-size stellarator.

Numerical analysis showed that atoms are formed mainly due to the dissociation of hydrogen molecules by an electron impact. In the intervals between pulses, when the radio-frequency heating is turned off, the role of dissociative recombination of molecular ions with electrons, which is an additional source of atomic hydrogen, increases.

To model the electron cyclotron plasma production at the W7-X stellarator, a comprehensive molecular model was developed that includes all collision processes and is effective at all stages of plasma production in the stellarator. A new feature of this model compared to previous models is the inclusion of neutral gas molecules and H_2^+ , and H_3^+ molecular ions in the particle balance equations. It is accounted for that neutral gas consists of molecular and atomic hydrogen. The radio-frequency module of the numerical code is modified accordingly. The model uses neoclassical diffusion, turbulent transport, and elementary processes of atomic and molecular collisions. The neutral gas balance considers the retention of charged particles and the recombination of hydrogen on the wall surface.

Based on this model, the one-dimensional numerical code has been updated. In addition to the radio-frequency module, a new module that calculates electron cyclotron heating at the second harmonic in the case of weak wave attenuation has been developed and included in the code.

The results of calculations for single pulses obtained using the updated numerical code are presented. With certain accuracy, the calculations reproduce the experimental pulse of the W7-X stellarator. The calculations showed that most hydrogen production occurs at the plasma decay stage when the low electron temperature stimulates recombination. A series of pulses must be used to ensure the continuity of atomic hydrogen generation. The results of modelling such a regime are also presented. Numerical calculations showed that this mode can serve as the basis for the scenario of cleaning the walls of the W7-X vacuum chamber.

Key words: RF plasma production, stellarator, Maxwell's equations, frame antenna, four-strap antenna.

Стандартна форма
З реквізитами типографії