

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Кулик Юлії Сергіївни
«Числове моделювання високочастотного
створення плазми в стелараторах»,
подану на здобуття ступеня
кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми

Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота Кулик Ю.С. присвячена розробці числових моделей і їх використанню для теоретичного дослідження високочастотного створення плазми в стелараторах за допомогою антенних систем. Актуальність та доцільність теми дисертації напряму пов'язана з проблемою керованого термоядерного синтезу, розв'язання якої посприяє вирішенню задачі отримання необхідних для забезпечення людства об'ємів енергії. Токамаки та стеларатори є найбільш перспективними установками, які призначені для створення умов для протікання процесів керованого термоядерного синтезу в високотемпературній плазмі. Тому створення плазми в таких установках є важливим аспектом термоядерної технології.

У дисертації наведено результати числових розрахунків з високочастотного створення плазми на установках Ураган-2М (Україна) та Wendelstein7-X (Німеччина), які отримані за допомогою розроблених числових моделей. Також представлено результати теоретичних досліджень високочастотного розряду в короткоімпульсному режимі, який застосовується для очищення поверхонь стінок вакуумної камери стелараторів, що також є важливим елементом робочого циклу термоядерних реакторів на основі стелараторних систем.

Структура і зміст дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, що присвячені викладенню оригінальних результатів, висновків, переліку використаних літературних джерел, списку публікацій за матеріалами дисертації та одного додатку.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет досліджень, представлено зв'язок роботи з науковими програмами та темами, сформульовані положення, що характеризують наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, оцінено особистий внесок здобувачки в роботи, опубліковані разом із співавторами, надано інформацію про апробацію результатів дисертації на міжнародних конференціях та семінарах.

У **першому** розділі представлено якісну методикку аналізу ефективності створення плазми високочастотними полями в іонному циклотронному діапазоні частот за допомогою антенних систем. В межах розглянутої методики необхідне лише розв'язання рівнянь Максвелла. Детально представлено числовий код для розв'язання рівнянь Максвелла в циліндричній геометрії та описано моделювання антенної системи зовнішніми високочастотними струмами. Наведено результати числового аналізу характеру процесу створення плазми на частоті нижчій за іонну циклотронну для торсатрона Ураган-2М за допомогою колінчастовальної та рамкової антен.

У **другому** розділі описано більш складну самоузгоджену теоретичну модель для високочастотного створення плазми в іонному циклотронному діапазоні частот, яка включає систему рівнянь балансу та крайову задачу для рівнянь Максвелла. В новій моделі враховано неокласичну дифузію і основні елементарні процеси взаємодії плазми з нейтральним газом.

Наведено числові розрахунки з високочастотного створення плазми, проведені для Урагану-2М за допомогою рамкової та чотиринапіввиткової антен.

Також у цьому розділі запропоновано і досліджено сценарій розряду в іонному циклотронному діапазоні частот в короткоімпульсному режимі. Подібні розряди застосовують для створення нейтральних атомів водню, які використовують для очищення стінок вакуумної камери стелараторів. Проведено оптимізаційний підбір параметрів для такого «чистячого» розряду для установки Wendelstein 7-X.

У **третьому** розділі представлено самоузгоджену модель високочастотного створення плазми в атмосферу молекулярного водню в стелараторах. Ця модель включає всі основні процеси зіткнень за участю електронів і є дієвою на всіх стадіях створення плазми. Проведено теоретичні

дослідження короткоімпульсного розряду у випадку електронного циклотронного нагріву плазми та проведено числове моделювання режиму з серією імпульсів. Показано, що у такому режимі досягається висока ефективність створення атомів водню. Результати дослідження можуть бути використані для розробки сценарію чистки стінок вакуумної камери установки Wendelstein 7-X.

У **висновках** чітко сформульовано основні результати, отримані в дисертації.

Усі розділи є взаємопов'язаними і спрямованими на досягнення мети та вирішення поставлених у дисертації задач. Стиль викладення матеріалів дисертації відповідає нормам і передає зміст роботи.

Автореферат повністю відображає зміст дисертації, основні її положення та висновки

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації

Отримані в роботі результати, висновки та запропоновані на їх основі рекомендації виглядають цілком достовірними та обґрунтованими. Авторкою використано добре перевірені теоретичні методики та ефективні методи аналітичних та числових розрахунків. Наукові положення дисертаційної роботи є достатньо і належним чином обґрунтованими. Одержані наукові результати мають чітку фізичну інтерпретацію.

Дисертаційні дослідження цілком **відповідають паспорту наукової спеціальності 01.04.08 – фізика плазми.**

Практичне значення результатів

У дисертаційній роботі отримано низку нових, цікавих та важливих результатів, які, безсумнівно, мають практичне значення. Розроблені числові моделі вже використовуються для моделювання процесів створення плазми в стелараторах Ураган-2М та Wendelstein7-X, а також при дослідженні нових сценаріїв створення плазми та при підготовці експериментів. Отримані в дисертаційній роботі результати можуть слугувати основою для сценаріїв створення плазми та чистки стінок вакуумної камери існуючих і майбутніх стелараторів.

Повнота викладення результатів роботи

За темою дисертації Кулик Ю.С. опубліковано 23 наукові праці. З них **11 публікацій** у наукових фахових виданнях, що входять до міжнародних

наукометричних баз Scopus та Web of Science, а також **12 тез доповідей** на міжнародних конференціях, що також підтверджує високий науковий рівень виконаної роботи.


Зауваження

1. При розрахунку напрацювання атомарного водню в часовому проміжку між імпульсами за рахунок дисоціативної рекомбінації молекулярних іонів H_2^+ враховувались лише іони в основному стані, чи також іони в коливальних станах $H_2^+ (v)$? Бо це також може вплинути на швидкість генерації атомів H.
2. Що ви можете сказати про співвідношення вкладу дисоціативної рекомбінації молекулярних іонів водню та дисоціації електронним ударом в швидкість напрацювання атомарного водню під час розрядного імпульсу та в проміжку між імпульсами
3. До недоліків дисертаційної роботи можна віднести відсутність деяких даних та параметрів щодо умов проведення числових експериментів, як у тексті, так і у підписах до рисунків, що могло б полегшити читання та розуміння роботи

Наведені зауваження не стосуються основних положень, що виносяться на захист, не знижують загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Кулик Ю.С. і не впливають на достовірність отриманих результатів.

Дисертаційна робота «Числове моделювання високочастотного створення плазми в стелараторах» є цілком завершеною самостійною науковою роботою, виконаною на високому рівні, а її авторка, Кулик Юлія Сергіївна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

Офіційний опонент
старший науковий співробітник
Інституту фізики НАН України,
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

 В.В. Ціолко



ВІРНО
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
ІФ НАН УКРАЇНИ
В.С. МАЙЖАРА

