

## **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*

Тема дисертаційної роботи стосується проблеми керованого термоядерного синтезу. Розвиток термоядерного синтезу цілком може стати вирішенням задачі використання невичерпного джерела безпечної термоядерної енергії для людства. Дослідження, викладені у дисертаційній роботі Кулик Ю.С., також роблять внесок у розв'язання цієї проблеми, адже створення плазми в тороїдальних магнітних пастках, якому присвячено дану роботу, є важливим аспектом термоядерної технології.

У сучасних дослідженнях велику роль відіграють числові методи. Фактично, без них були б неможливими ані моделювання процесів у плазмі сучасних термоядерних пристроїв, ані прогностичні дослідження стосовно сучасних пристроїв чи пристроїв наступних поколінь. У дисертації розроблено самоузгоджену числову модель для високочастотного створення плазми в альвеновому діапазоні частот, що дозволяє моделювати еволюцію розподілу густини і температури електронів плазми, зумовлену високочастотним нагрівом. Крім того, за допомогою числових експериментів для стеларатора Ураган-2М з використанням чотиринапіввиткової антени винайдено перспективний сценарій створення плазми. На додаток, запропоновано і досліджено сценарій високочастотного розряду в імпульсному режимі, який дає змогу очищувати поверхні стінок вакуумної камери.

#### *Загальна характеристика роботи*

Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і одного додатку. Загальний обсяг дисертації складає 166 сторінок. Дисертаційна робота містить 61 рисунок та 1 таблицю. Список використаних джерел містить 117 посилань на 13 сторінках.

У *вступі* викладено важливість і актуальність теми дисертації, зв'язок з науковими програмами і темами, визначено мету, завдання роботи, наведено дані про наукову новизну отриманих результатів, їх практичне значення, висвітлено особистий внесок здобувачки в опублікованих роботах за темою дисертації та надано відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи.

У *першому* розділі наведено короткий опис найбільш поширених методів високочастотного створення плазми в установках стелараторного типу, описано фізичні процеси, що відбуваються при створенні плазми.

Здобувачкою представлено 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. За допомогою числового коду проведено такий якісний аналіз характеру процесу створення плазми на частоті нижчій за іонну циклотронну для установки Ураган-2М за допомогою антен колінчастовального та рамкового типів.

У *другому* розділі представлено нову самоузгоджену одновимірну модель для високочастотного створення плазми в іонному циклотронному діапазоні частот, що дозволяє моделювати цей процес з урахуванням радіальних неоднорідностей густини плазми і її температури та їх впливу на розподіл і поглинання високочастотних полів у плазмовому шнурі.

Представлено результати розрахунків з високочастотного створення плазми в стелараторі Ураган-2М за допомогою рамкової та чотиринапіввиткової антен. Наведено результати числових досліджень щодо здатності чотиринапіввиткової антени підвищувати густину плазми в стелараторі Ураган-2М.

Запропоновано і досліджено сценарій високочастотного розряду в імпульсному режимі. Досліджений у даному розділі високочастотний розряд застосовується для створення нейтральних атомів, які призначаються для очищення поверхонь стінок вакуумної камери шляхом хімічної взаємодії із забрудненнями. Проведено оптимізацію чистячого розряду (підбір параметрів розряду для генерації атомарного водню) для установки Wendelstein 7-X.

У *третьому* розділі представлено самоузгоджену молекулярну модель високочастотного створення плазми в стелараторах, що включає всі основні процеси зіткнень, і може використовуватись на всіх стадіях створення плазми в стелараторі. Вона може моделювати створення плазми,



як в іонному циклотронному, так і в електронному циклотронному діапазонах частот. Наведено результати числового моделювання короткоімпульсного розряду для електронного циклотронного нагріву плазми та проведено числове моделювання режиму з періодичними імпульсами.

*Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, що сформульовані у дисертаційній роботі, забезпечені коректною постановкою задач, використанням відомих аналітичних та числових методів математичної фізики та фізики плазми, сучасних теоретичних підходів. Всі методи, що застосовані у дисертації, є надійними та перевіреними. Дисертація є добре структурованою, що сприяє розумінню викладеного матеріалу. Наукові положення та висновки, представлені у дисертації, є достатньо і належним чином обґрунтованими та віддзеркалюють повноту виконання поставлених перед здобувачкою задач.*

Дослідження відповідають паспорту наукової спеціальності 01.04.08 – фізика плазми.

#### *Оцінка новизни та практичне значення результатів*

Дисертація містить низку нових і цікавих результатів. Усі вони мають практичне значення та заслуговують на увагу.

Отримані в дисертаційній роботі результати роблять внесок у розвиток фізичної картини високочастотних плазмових розрядів, методів високочастотного створення плазми в установках стелараторного типу, можуть слугувати основою для сценаріїв створення плазми та чистки стінок вакуумної камери стелараторів.

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 на вищезгаданих установках.

Елементи числового коду використовуються в коді TOMATOR-1D (Лабораторія фізики плазми Королівської військової академії, Брюссель, Бельгія).

Викладені в дисертації результати мають загальне практичне значення для всіх установок стелараторного типу.

### *Повнота викладення результатів дисертації в публікаціях*

Основні результати дисертаційної роботи відображено у 23 наукових працях, серед яких 11 публікацій у наукових фахових виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science та 12 матеріалах і тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Кількість публікацій за темою дисертації є достатньою та відповідає вимогам МОН України стосовно публікацій здобувачів наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.

### *Апробація результатів дисертації.*

Результати, що увійшли до дисертаційної роботи, були успішно представлені на низці міжнародних та національних конференцій.

### *Зауваження до дисертаційної роботи*

Водночас до дисертаційної роботи можна висунути деякі зауваження:

1. У дисертації детально описана розвинена самоузгоджена одновимірна модель створення плазми (2.1). Бажано б було навести інформацію про тестові чи модельні задачі на яких вона тестувалася та наскільки добре вона їх відтворювала.

2. Самоузгоджена одновимірна модель створення плазми (2.1) містить температуру іонів  $T_i$  у доданку, що описує обмін енергією між електронами та іонами. Оскільки система не містить рівняння для температури іонів  $T_i$ , то не зрозуміло звідки береться іонна температура та наскільки важливий доданок, що описує обмін енергією між електронами та іонами.

3. Одним з недоліків, на мій погляд, є відсутність детальних порівнянь результатів теоретичних досліджень з результатами експериментів на установці Ураган-2М.

4. До недоліків дисертаційної роботи також можна віднести недостатньо досконалу мову викладення матеріалу, недостатньо продуману систему позначень, що часом ускладнює прочитання роботи.

Проте зазначені вище зауваження не впливають на якість та достовірність отриманих результатів і не знижують загального позитивного враження від дисертаційної роботи.



### Загальний висновок

Дисертаційна робота «Числове моделювання високочастотного створення плазми в стелараторах» Кулик Ю.С. виконана на високому науковому рівні та є завершеним науковим дослідженням. Автореферат повною мірою віддзеркалює основний зміст дисертації.

Враховуючи зміст, актуальність, обґрунтованість наукових положень і висновків, наукову новизну, обсяг проведених досліджень, дисертаційна робота відповідає всім вимогам «Порядку присудження наукових ступенів» (постанова Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567, зі змінами), які висуваються до кандидатських дисертацій, 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

Провідний науковий співробітник

Інституту ядерних досліджень НАН України

доктор фізико-математичних наук

старший науковий співробітник

Вадим ЛУЦЕНКО

Підпис Вадима ЛУЦЕНКА засвідчую

Учений секретар

Інституту ядерних досліджень НАН України



Наталія ДОРОШКО