

## **Відгук офіційного опонента**

на дисертаційну роботу Третяка Красимира Костянтиновича

**«Нагрів і діагностика плазми тороїдальних пасток  
короткохвильовими високочастотними полями»,**

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми

Нагрівання плазми високочастотними електромагнітними хвилями широко використовується в дослідженнях з керованого термоядерного синтезу в установках з магнітним утриманням. Зокрема, метод іонного циклотронного нагрівання плазми з допомогою швидких магнітозвукових хвиль застосовується в токамаках JET, ASDEX-Upgrade, NSTX-U, стелараторі LHD, торсатронах «Ураган». Його планують використовувати у найбільшому в світі стелараторі Wendelstein 7-X. Також електромагнітні хвилі надвисокочастотного діапазону застосовуються для визначення параметрів плазми, діагностичні системи з використанням таких хвиль є майже на всіх тороїдальних установках з магнітним утриманням. Тому, важливим є детальне вивчення впливу складної тривимірної геометрії торсатрона на розповсюдження високочастотних хвиль у плазмі і вдосконалення методів рефлектометрії (на основі як звичайної так і незвичайної хвилі) для діагностики плазми в торсатронах та сферичних токамаках, а тема дисертаційного дослідження Третяка К.К. безумовно є актуальною. Матеріали дисертації є частиною фундаментальної науково-дослідної роботи, яка виконана в рамках цілого ряду державних тем ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут».

Дисертація включає вступ, п'ять розділів, висновки та список літератури.

У вступі обґрунтована актуальність теми роботи, розкритий її зв'язок із науковими програмами, планами та темами, сформульована мета та перелічені завдання дослідження, визначені об'єкт та предмет дослідження, коротко описані методи дослідження, представлені його наукова новизна та практичне

значення, особистий внесок здобувача, апробація результатів, перелічені публікації за темою дисертації.

Перший розділ містить огляд літератури. В ньому, зокрема, висвітлені особливості високочастотного нагріву тороїдальної плазми в області іонних циклотронних частот, наведені параметри торсатрона «Ураган-3М» та антен, які використовуються для нагрівання плазми, викладені основні положення рефлектометрії плазми як з допомогою звичайних так і незвичайних хвиль.

Другий розділ присвячений дослідженню високочастотного нагрівання плазми в торсатроні «Ураган-3М» швидкими та повільними хвилями в іонному циклотронному діапазоні частот. Представлений якісний аналіз нагрівання неоднорідної плазми з допомогою так званої трінапіввиткової антени, а також числове моделювання (методом променевих траєкторій) розповсюдження повільної хвилі, що збуджується рамочною антеною в неоднорідній плазмі торсатрона «Ураган-3М».

У третьому розділі представлена постановка задачі про відновлення параметрів плазми по даним діагностики, яка зводиться до нелінійних інтегральних рівнянь зі змінною верхньою межею. Автором запропонований числовий ітераційний метод послідовних наближень з використанням квадратурних формул для обчислення значень інтегралу на кожному проміжку інтегрування для розв'язування інтегральних рівнянь, який можна ефективно використовувати для відновлення параметрів плазми по зашумленим вхідним даним. Виконана оцінка похибки використання інтерполяційного полінома.

Четвертий розділ присвячений вивченню можливості застосування двополяризаційної (з одночасним використанням як звичайної так і незвичайної хвилі) рефлектометрії в торсатроні «Ураган-2М». Обговорено параметри багатоканальної системи рефлектометрії з фіксованим набором частот та особливості її застосування для визначення профілю густини плазми з використанням розроблених автором числових алгоритмів. Максимальне значення частоти рефлектометра накладає обмеження на максимальне значення густини плазми, яке можна виміряти з допомогою звичайної хвилі. Встановлено, що використання незвичайної хвилі разом із звичайною дозволяє

вимірювати удвічі ширший діапазон густин плазми, причому метод вимірювання є стійким відносно зміщення плазмового шнура і шумового випромінювання плазми.

У п'ятому розділі запропоноване і теоретично обґрунтоване застосування двополяризаційної рефлектометрії для одночасного визначення полоїдального магнітного поля і профілю густини у сферичному токамаці на прикладі вузькополосної багатоканальної системи з швидкою зміною частоти у заданому діапазоні. Для спрощення розгляду використовувалася одномірна модель.

Новизна результатів дисертаційної роботи визначається тим, що в ній уперше:

- показаний визначальний вплив тримірної неоднорідності параметрів плазми торсатрона «Ураган-3М» на розповсюдження і поглинання швидкої хвилі;

- з'ясовано, що повільна хвиля розповсюджується лише на периферії плазмового шнура торсатрона «Ураган-3М»;

- розроблені ітераційні алгоритми числового розв'язання інтегральних рівнянь, які пов'язують зсув фази звичайної і незвичайної хвилі з просторовими розподілами параметрів плазми;

- показано, що застосування двополяризаційної рефлектометрії для визначення профілю густини плазми в торсатроні «Ураган-2М» суттєво розширює діапазон густин, які можна виміряти з використанням багатоканального рефлектометра з фіксованим набором частот;

- запропонований і теоретично обґрунтований новий метод вимірювання профілю полоїдального магнітного поля в сферичних токамаках у яких для зондування плазми одночасно використовується звичайна і незвичайна хвилі.

Усі отримані в дисертації результати мають практичну цінність. Зокрема, детальний аналіз збудження, розповсюдження і поглинання високочастотних хвиль у торсатроні «Ураган-3М», виконаний шляхом числового моделювання з урахуванням просторової неоднорідності плазми, важливий для всебічного розуміння і аналізу нагрівання плазми з допомогою рамочної та тринапіввиткової антени в торсатроні «Ураган-3М». Розроблений і

реалізований модульний променевий код може бути застосований для обчислення розповсюдження і поглинання високочастотних полів у інших тороїдальних термоядерних установках. Важливе практичне значення має запропонований метод двополяризаційної рефлектометрії діагностики плазми. Він, зокрема, може бути застосований для визначення профілю полоїдального магнітного поля в сферичних токамаках.

Наукові положення дисертаційної роботи та її основні висновки виглядають достатньою мірою обґрунтованими та достовірними. Це обумовлено коректним використанням у дисертації добре апробованих теоретичних та числових методів. Запропоновані у роботі методи діагностики плазми були детально протестовані: із наперед заданого профілю генерувались вихідні дані, на їх основі відбувалося відновлення профілю, який порівнювався із заданим. Перевірялась стійкість методу відносно випадкових похибок.

Результати дисертаційної роботи викладені в 5 статтях у наукових фахових виданнях: «Journal of Fusion Energy», «Фізика плазми», «Журнал технической физики», «Питання атомної науки і техніки, серія Фізика плазми». Слід відмітити, що одна із статей є одноосібною. Крім того дисертант є співавтором ще чотирьох статей в журналі «Питання атомної науки і техніки», які не ввійшли в дисертацію. Основні результати дисертації є апробованими, вони доповідались на міжнародних наукових конференціях як в Україні так і закордоном.

Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації.

До дисертації можна висловити окремі зауваження та побажання.

1. Оскільки в основі кожного оригінального розділу дисертації лежать окремі статті, то існує деяка неузгодженість позначень між розділами та дублювання. Наприклад у розділі 5 для позначення фази використовується  $\varphi$ , а в попередній розділах  $\Phi$ . На с. 86 вказано, що згладжування вихідних даних виконувалось із допомогою кубічних сплайнів, а на с. 116, де мова знову заходить про сплайни, наводиться формула кубічного сплайну. Формули (1.13), (4.9) і (5.6) є, по суті, однаковими.

2. В розділі 3 не обґрунтований вибір модельної функції для профілю плазми (с. 85) так само як і параметру пікірування  $\zeta=2,-2$ . Той самий профіль використовувався у розділі 2 (формула наведена на с.48 в інших позначеннях), але параметр пікірування не вказаний. Далі в розділі 2 використовується дещо інший профіль, який представлений формулою (2.17).
3. В роботі є описки, наприклад на с. 98 у таблиці 4.1. в останній колонці повинно бути «преобразовании частоты вверх», а не «вниз». На рисунках 5.3, 4.1 використовуються англійські аббревіатури, а в тексті російські. На с. 101 у формулі Планка зайва літера  $\mu$ .

Втім, наведені зауваження не впливають на загальну високу оцінку роботи.

Підсумовуючи викладене вище, вважаю, що дисертація Третяка К.К. «Нагрів і діагностика плазми тороїдальних пасток короткохвильовими високочастотними полями» є завершеною науково-дослідною роботою. Отримані автором нові науково обґрунтовані теоретичні результати в сукупності є суттєвими для розвитку методів іонного циклотронного нагрівання і двополяризаційної рефлектометрії плазми в стелараторах та сферичних токамаках. За обсягом і рівнем отриманих наукових результатів, кількістю та якістю публікацій робота відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата наук, а її автор цілком заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

Кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри фізики функціональних матеріалів  
фізичного факультету Київського національного  
університету імені Тараса Шевченка

А.І. Момот

