

Відгук офіційного опонента
на дисертаційну роботу Моїсеєнка Володимира Євгеновича
“Високочастотні плазмові розряди в пробкотронах і стелараторах”,
подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних
наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

Дисертаційна робота Моїсеєнка В.Є. присвячена розробці числових методів та моделей високочастотних полів у плазмі, результатам моделювання ВЧ нагріву плазми у пробкотроні, високочастотному нагріву плазми за допомогою антен у стелараторах Ураган-3М та Ураган-2М. У ній наведені також результати досліджень (як експериментальних, так й теоретичних) процесу очищення внутрішніх стінок низки плазмових установок (Ураган-3М, Ураган-2М та Wendelstein7-X), а також запропоновано новий стелараторно-пробкотронний гібридний термоядерно-ядерний реактор й виконано необхідні розрахунки, які обґрунтовують ефективність такого реактору.

Актуальність теми дисертаційної роботи пов'язана з необхідністю забезпечення людства надійним джерелом енергії. Запаси корисних копалин не є нескінченними, до того ж їх використання в якості палива призводить до зміни клімату. Відновлювальні джерела енергії (сонячна, термальна, вітрова) на цей час не можуть повністю задовольнити потреби. Найбільш перспективними є пристрої керованого термоядерного синтезу, які здатні стати практично невичерпним джерелом. Тому наведені в дисертаційній роботі Моїсеєнка В.Є. результати є актуальними.

Структура та зміст дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'ятьох розділів та висновків, а також списку використаних джерел й додатків.

У **Вступі** детально обговорюються актуальність теми дисертаційної роботи та необхідність як експериментального, так і теоретичного дослідження ВЧ розрядів у таких термоядерних пристроях, як пробкотрони, стеларатори та стелараторно-пробкотронні гібриди. Наведено обґрунтування актуальності теми дисертації, визначено мету, предмет, об'єкт та методи досліджень. Сформульовано положення, що характеризують наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, оцінено особистий внесок автора в роботах за темою дисертації, наведено дані про зв'язок роботи з науковою тематикою досліджень, які проводять в ІФП ННЦ ХФТІ, та відомості про апробацію результатів на конференціях.

Перший розділ роботи присвячено розробці та вдосконаленню числових методів та моделей, за допомогою яких можна розв'язати рівняння Максвелла у плазмі ВЧ розрядів. Такі методи та моделі важливі для розв'язання практичних завдань. Зокрема, розроблено чисельно стійкий метод зважених нев'язок і модель для рівнянь Максвелла у циліндричній геометрії, оригінальна чисельно стійка модель для розрахунку електромагнітних полів в плазмі осесиметричних та неосесиметричних відкритих пасток. Важливим є розроблений дисертантом оригінальний і

ефективний метод для розрахунків щодо задач із сильно осцилюючими розв'язками. Завдяки використанню негустої сітки стало можливим істотно знизити обчислювальні витрати. Особливо відзначу, що дисертант запропонував нову форму рівнянь Максвела для числового моделювання, що дозволило забезпечити числову стійкість.

Другий розділ містить детальний аналіз можливостей ВЧ нагрівання плазми у пробкотронах. Зокрема, дисертант зробив порівняльний аналіз таких методів ВЧ нагрівання плазми в пробкотронах, як нагрівання на доміщі, на другій гармоніці, за допомогою швидкої хвилі та швидке нагрівання на зіткненнях. Він для відкритої пастки з прямими силовими лініями розробив модель іонно-циклотронного нагрівання іонів, що плещуться, а також запропонував сценарій нагрівання іонів на другій циклотронній гармоніці. Дисертант також винайшов та детально проаналізував сценарій швидкого нагрівання плазми в пробкотроні під час її створення, який має значну ефективність.

Третій розділ присвячений дослідженням Альфвенова нагрівання плазми на установках Ураган-3М і Ураган-2М за допомогою компактних антен на базі напіввиткових елементів. Зокрема, під час експериментів на Урагані-3М за допомогою трьох-напіввиткової антени була доведена успішність ВЧ нагрівання плазми Альфвеновими хвилями з високими k_{\parallel} , при цьому у декілька разів була збільшена початкова густина плазми. Було також показано, що незважаючи на вади магнітної конфігурації, ВЧ розряди в Урагані-3М ефективно нагрівають плазму. Особливо цікавим вважаю виявлення двох зон в плазмовому шнурі Урагана-3М з різними температурами електронів. Було надано рекомендації змістити магнітну конфігурацію всередину, щоб площа вкладених магнітних поверхонь стала ширшою, а не лише в центральній зоні плазми. Також дисертант впровадив та дослідив ВЧ нагрівання плазми в Урагані-2М за допомогою нової колінчастовальної антени, яка нагріває плазму на частотах нижче іонно-циклотронної частоти.

У **четвертому розділі** дисертації наведено результати експериментів з плазмового очищення внутрішніх поверхонь термоядерних установок Ураган-2М, Ураган-3М та Wendelstein7-X за допомогою високочастотних розрядів. При цьому ВЧ очищення на Урагані-2М за допомогою безперервного УКХ розряду виявилось дуже ефективним, а плазма заповнювала увесь об'єм утримання. Дисертант впровадив та детально дослідив процес ВЧ очищення на стелараторі Wendelstein7-X за допомогою ультракоротких імпульсів електронно-циклотронного нагрівання в атмосфері водню. Також важливими є результати дослідження імпульсного ВЧ очищення на Урагані-3М у слабкому магнітному полі. Цікавим є те, що для очищення можна використовувати ті ж антени та ВЧ генератори, що й для створення і нагрівання плазми в робочих режимах. При цьому таке очищення вакуумних поверхонь виявилось достатньо ефективним.

У **п'ятому розділі** дисертант запропонував оригінальну концепцію стелараторно-пробкотронного ядерно-термоядерного гібриду для

трансмутації відпрацьованого ядерного палива. За допомогою поєднання стеларатора та пробкотрона можливо локалізувати потік нейтронів термоядерного синтезу саме в пробкотронній частині пристрою, що оточена ядерним реактором. Така схема гібридного реактора, запропонована дисертантом, є перспективною, про що свідчать наведені в дисертаційній роботі результати розрахунків. Вважаю цей результат найбільш вагомим досягненням дисертанта. Додатково було проведено моделювання стелараторно-пробкотронного гібриду з інжекцією нейтральних атомів, завдяки чому можливо створити популяцію гарячих іонів тритію в пробкотронній частині пристрою.

У **Висновках** автор навів основні результати, які були вперше отримані в дисертаційній роботі. Вважаю, що ця дисертаційна робота є істотним внеском у дослідження процесів у ВЧ плазмових розрядах у термоядерних установках.

Результати, які були отримані дисертантом, висновки та запропоновані їм рекомендації є достовірними та обґрунтованими. Дисертант використав експериментальні методики та методи теоретичних розрахунків, які є надійними й добре перевіреними.

Результати дисертаційної роботи становлять значний фундаментальний та практичний інтерес. Вони вже широко використовуються для досліджень та оптимізації термоядерних реакторів як в Інституті фізики плазми ННЦ ХФТІ, м. Харків, так й у стелараторах в інших країнах, зокрема, у Wendelstein7-X (Німеччина).

Основні результати дисертації викладено в 34-х наукових працях, зокрема, у 20 статтях у фахових журналах, які індексується у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science, та 14 матеріалах і тезах доповідей на наукових міжнародних конференціях. Це підтверджує високий науковий рівень виконаної роботи.

До дисертації можна зробити декілька **зауважень**.

1. Дисертант у 3 розділі навів результати досліджень за допомогою Ленгмюрівських зондів. Було б доцільно, по перше, надати в тексті інформацію про форму та розміри зондів. По друге, не надано опис методу аналізу зондової вольт-амперної характеристики з метою отримання параметрів плазми, або хоча б посилання на роботу з такою інформацією.
2. У підписі до Рис.2.6 дисертаційної роботи та до Рис.2 автореферату бачимо: «Червоний колір відповідає за напруженість поля 0.55 В/см, синій – 0.55 В/см». Підпис до Рис. 2.17 містить текст: «Червоний колір відповідає напруженості поля 0.85 В/см, синій – 0.85 В/см». Не зрозуміло, яка різниця між значеннями поля для червоних та синіх ліній.
3. Відсутні підписи до Рис.3.5 та 3.6.
4. У великій кількості рисунків присутній текст англійською або російською мовами.
5. У тексті є також деякі неточності. Наприклад, зустрічаються “стеларатор” та “стелларатор”. Можна зустріти різні варіанти слова

“очищення” –“чистка” або “чищення”. Присутні у тексті також неузгоджені слова, наприклад, «конверсія швидкої магнітозвукових хвилі» (стор.120), «на основний циклотронної гармоніці» (стор. 121), «швидка магнітозвукових хвиля є не поширюються» (стор. 125), «антени антен» (стор. 180) та інші.

Але ці зауваження жодним чином не ставлять під сумнів достовірність та цінність одержаних у дисертації результатів.

Текст дисертації написано зрозумілою мовою. Гарному розумінню суті сприяє також велика кількість ілюстративного матеріалу. Дисертація акуратно оформлена. Автореферат правильно та з достатньою повнотою відображає зміст дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота є завершеним дослідженням, виконаним на високому науковому рівні. Автором одержано оригінальні теоретичні та експериментальні наукові результати, які роблять істотний внесок в розуміння фізики процесів у високочастотній плазмі термоядерних реакторів.

Таким чином, на мою думку, дисертаційна робота Моїсеєнка Володимира Євгеновича “Високочастотні плазмові розряди в пробкотронах і стелараторах” цілком відповідає вимогам чинних нормативних документів до докторських дисертацій, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.

Професор ННІ “Фізико-технічний факультет”
Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна,
доктор фіз.-мат. наук,
старший науковий співробітник
“ 27 ” квітня 2021 р.

Валерій ЛІСОВСЬКИЙ

ПІДПИС ЗАСВІДЧЕНИЙ
Начальник



Лісовський