

**Відгук офіційного опонента**  
**на дисертаційну роботу Коровіна Валерія Борисовича**  
**“Застосування високочастотних джерел електромагнітних полів у**  
**стелараторах Ураган”,**  
**подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних**  
**наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми.**

Дисертаційна робота Коровіна В.Б. присвячена експериментальному дослідженню взаємодії комплексу ВЧ джерел електромагнітних полів з плазмою в тороїдальних установках Ураган, процесів очищення вакуумної камери безперервним розрядом в УКХ діапазоні на частоті вище за іонно-циклотронний резонанс у комбінації з імпульсними розрядами, а також розробці нового способу пригнічення електронів-утікачів шляхом накладання електричного постійного поля від ВЧ антени рамкового типу.

**Актуальність теми** дисертаційної роботи пов'язана з перспективами стелараторів в якості пристроїв для отримання керованого термоядерного синтезу. Для оптимізації термоядерного реактора–стеларатора необхідно не лише розробляти ефективні джерела електромагнітних полів для створення гарячої плазми, але й досягати найменших концентрацій домішок у плазмовому середовищі, при цьому запобігати появі електронів–втікачів, здатних пошкоджувати стінки стеларатора та діагностичне обладнання.

**Структура та зміст дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків, а також списку використаних джерел та додатків.

У **Вступі** міститься короткий огляд сучасного стану наукової проблеми, що досліджується. Наведено обґрунтування актуальності теми дисертації, визначено мету, предмет та об'єкт 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 містить детальний огляд існуючих ВЧ систем, які застосовуються на сучасних термоядерних установках усього світу для очищення вакуумної камери та нагрівання плазми. Зокрема, розглянуто ВЧ системи іонно-циклотронного нагрівання. Наведено методи ВЧ очищення вакуумних камер. Зроблено аналіз різних методів пригнічення потоків електронів–утікачів.

**Другий розділ** присвячений різним аспектам взаємодії плазми з ВЧ антеною та джерелом ВЧ поля. Досліджено вплив плазмового навантаження на радіотехнічні характеристики ВЧ системи у стелараторі Ураган 2–М. Детально описані ВЧ джерела Каскад–1 та 2, які були розроблені та протестовані дисертантом, для створення і нагріву плазми у стелараторах. Розглянуто особливості вимірювань ВЧ параметрів на стелараторах Ураган. Запропоновано та здійснено метод послаблення гармонік у лінії передачі ВЧ

потужності в антену. Також для зменшення часу формування гарячої плазми запропоновано створювати режим попередньої іонізації (додаткову плазму низької густини) та детально досліджено його у стелараторі Ураган – 3М.

**Третій розділ** присвячений експериментам із дослідження високочастотного очищення вакуумної камери. Багато цікавих результатів було отримано за допомогою криогенної пастки в якості спеціального оперативного способу контролю ефективності плазмового очищення поверхні камер термоядерних установок, яке повинне проводитись при підготовці до експериментів зі створення гарячої плазми. Дисертант запропонував розмістити у вхідному патрубку одного з насосів криогенну пастку, на поверхні якої будуть конденсуватись гази, які відкачуються з вакуумної камери під час проведення очищення. Після деякого часу роботи криогенну пастку герметизують й нагрівають, конденсовані гази випаровуються, завдяки чому можливо визначити їх тиск й оцінити ефективність плазмового очищення. Дисертант також розробив генератор УКХ поля, який був використаний для очищення вакуумної камери в стелараторі Ураган-2М безперервним розрядом на частоті вище за іонно-циклотронний резонанс (130 МГц). За допомогою Ленгмюрівського зонда були виміряні густина та температура електронів протягом процесу плазмового очищення. Більше того, дисертант поєднав безперервний УКХ розряд на частоті вище ІЦР з іншими видами розрядів для очищення (з НВЧ генератором  $f_g=2,4$  ГГц, який створював плазму, а також з імпульсним ВЧ генератором Каскад-1,  $f_g=4,7$  МГц), що дозволило суттєво збільшити кількість відкачуваного газу з камери й підвищити ефективність процесу очищення.

**Четвертий розділ** дисертації присвячений управлінню потоками електронів-утікачів у стелараторах Ураган. Спочатку дисертант теоретично дослідив спосіб впливу електростатичного поля на потік електронів-утікачів та визначив умови їх формування у стелараторах Ураган-2М та 3М. На одну з антен, призначених для введення ВЧ енергії від генераторів в об'єм камери для створення і нагрівання плазми, підводилася постійна напруга. Дисертант експериментально визначив, що постійне електричне поле в місці розташування електрода впливає на електрони, що пролітають. Ці електрони утримуються накладеним полем й не відхиляються на стінку установки. Було також досліджено вплив потоку електронів-утікачів на параметри плазми. Дуже цікавими, на мій погляд, є експерименти зі стимулювання потоків електронів-утікачів у стелараторі з імпульсним магнітним полем.

У **Висновках** автор чітко формулює основні результати, які вперше отримані в дисертації і, на мій погляд, роблять істотний внесок у фізичну картину процесів взаємодії ВЧ джерел електромагнітних полів з плазмою в тороїдальних установках Ураган. Вони дозволяють розробити нові більш ефективні методи очищення вакуумних камер у термоядерних установках. Значним внеском також є розроблений і досліджений у стелараторах Ураган спосіб пригнічення електронів-утікачів шляхом накладання електричного постійного поля від ВЧ антени.

Отримані результати, висновки та запропоновані на цій основі рекомендації виглядають цілком достовірними та обґрунтованими. Автором використано надійні, добре перевірені експериментальні методики та методи теоретичних розрахунків. Розроблена в дисертації теоретична модель плазми у стелараторах базуються на сучасних уявленнях про фізичні процеси, є логічним удосконаленням моделей, розроблених іншими авторами. Все це свідчить про достовірність та обґрунтованість наукових положень дисертації та її висновків.

Результати дисертації становлять значний фундаментальний та практичний інтерес. Вони вже частково використані і можуть використовуватись надалі для оптимізації термоядерних реакторів як в Інституті фізики плазми ННЦ ХФТІ, м. Харків, так й стелараторах в інших країнах.

Основні результати дисертації викладено в 21-й науковій праці, зокрема, у 8 статтях у фахових журналах, двох авторських свідоцтвах та 11 матеріалах і тезах доповідей на наукових конференціях. Результати робіт пройшли апробацію на низці міжнародних конференцій, що підтверджує високий науковий рівень виконаної роботи.

До дисертації можна зробити ряд **зауважень**.

1. Дисертант використовував у своїх експериментах Ленгмюрівський зонд. Але в тексті не пояснено, який саме зонд - плоский, циліндричний або сферичний. Відсутня хоча б одна вольт-амперна характеристика зонда, з якої визначались параметри плазми. Також в авторефераті відсутня відповідна формула для зондового струму (в тексті дисертації вона наведена на стор.103). Взагалі зондові вимірювання у високочастотній плазмі вимагають використання спеціального обладнання, без чого виміряні величини температури електронів будуть у 2-3 рази завищені у порівнянні з температурами, які є в плазмі. Формула, яку дисертант використовував для отримання температури електронів із зондової вольт-амперної характеристики, може бути застосована лише для ідеального плоского зонда. Використання її для аналізу вольт-амперних характеристик циліндричного чи навіть реального плоского зонда (з відсутністю постійного іонного струму насичення) призводить до значного завищення температури й, як наслідок, великої похибки у вимірюванні густини плазми.
2. На Рис. 3.7 дисертації та на Рис.8 автореферату повинні бути показані залежності густини і температури електронів в УКХ розряді від напруженості магнітного поля. Насправді там присутні два однакових рисунки лише для густини електронів.
3. Дисертант виявив вищі гармоніки основної частоти та розробив метод і пристрій для їх пригнічення. Це значно покращило точність вимірювань ВЧ потужності. Але при цьому він втратив можливість контролювати момент закінчення процесу плазмового очищення за допомогою вимірювання амплітуди другої гармоніки розрядного струму. До того ж, наявність більш високих частот (гармонік) покращує нагрівання електронів у плазмі, що також було втрачено.

4. У Таблиці 3.1 (Розрахункові параметри плазми при різних сумішах газів) у другій колонці замість “Н<sub>2</sub>” чи “N<sub>2</sub>” написано лише “2”. Не зрозуміло, для якого саме газу наведені результати.

5. У тексті присутні неточності. Наприклад, можна знайти не лише “стеларатор”, а й “стелларатор” та “стеларотор” (розділ 4.2). Так само є різні варіанти слова “очищення” – “оочищення”, “чистка” та “чищення”. Багато ком відсутні або стоять там, де не потрібні. Зустрічаються зліплені (не розділені) слова. Яскравий приклад цього – назва конференції “«Nano-andmicro-sizedstructuresinplasmas»” в авторефераті. У розділі 4 дисертант багато разів використовує слово “потенційна” (енергія), треба у цьому випадку писати “потенціальна”. Зустрічаються фрази: “Автогенератори ... мають однакову конструктивну конструкцію” (стор.53).

Але ці зауваження не ставлять під сумнів достовірність та цінність одержаних в дисертації результатів, а скоріш говорять про доцільність подальшої роботи з експериментального та теоретичного дослідження процесів у плазмі стелараторі Ураган.

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 наукові результати, які роблять істотний внесок в розуміння фізики процесів у плазмі термоядерних реакторів.

Таким чином, на мою думку, дисертаційна робота Коровіна Валерія Борисовича “Застосування високочастотних джерел електромагнітних полів у стелараторах Ураган” цілком відповідає вимогам чинних нормативних документів до кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата 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  
“ 23 ” грудня 2020 р.

Валерій ЛІСОВСЬКИЙ

Логіна Засвідчує  
Директор



М. О. Дзаргішвілі