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

Актуальність теми дисертації.

Невід'ємною частиною всіх міжнародних програм, які спрямовані на досягнення керованого термоядерного синтезу (КТС), є ретельне вивчення взаємодії високочастотного (ВЧ) випромінювання з плазмою, розробка, створення і експериментальне дослідження роботи ВЧ комплексів і окремих вузлів ВЧ обладнання, управління потоками електронів - утікачів (ЕУ). Саме вивченню цих питань присвячена дисертаційна робота Б.В. Коровіна, тому актуальність роботи не викликає сумніву.

Дисертаційну роботу виконано в ІФП ННЦ ХФТІ відповідно до планів науково-дослідних робіт. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним дослідженням, що проводяться у відділі стелараторів ННЦ ХФТІ. Отримані результаті застосовано на стелараторах Ураган-2М (U-2M) та Ураган-3М (U-3M). Результати роботи є цікавими у науковому відношенні і корисними для практичного застосування.

Загальна характеристика роботи.

Дисертаційна робота побудована за загально прийнятим планом і складається зі вступу, 4 розділів основного тексту з 57 рисунками та однією таблицею, висновків, списку використаних джерел (153 найменування) та 2 додатків - усього 156 сторінок.

У вступі міститься короткий огляд сучасного стану наукових проблем, які досліджуються в дисертації. Наведено актуальність та обґрунтування вибору теми дисертації, визначено мету і завдання, предмет і об'єкт досліджень, вказані методи досліджень, сформульовані положення, що характеризують наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, оцінений особистий внесок автора в роботах по темі дисертації, наведено відомості про апробацію результатів і дані про зв'язок роботи з науковою тематикою досліджень, які проводять в ІФП ННЦ ХФТІ.

У першому розділі проаналізовано застосування ВЧ систем на сучасних термоядерних установках як для очищення вакуумних камер, так і для нагріву плазми. Наведено відомості як про однокаскадні (КТМ), так і складні багатокаскадні ВЧ генератори з потужністю в десятки МВт (JET, ITER), які використовуються в якості джерел додаткового ВЧ нагрівання плазми. Проаналізовано умови виникнення потоків ЕУ і методи управління цими потоками на різних установках КТС. Всебічний та глибокий аналіз літературних джерел дозволив дисертанту визначити пріоритетні напрямки досліджень та шляхи їх реалізації.

У другому розділі представлені результати експериментальних досліджень взаємодії плазми з ВЧ антенами і джерелами ВЧ хвиль. Досліджено вплив навантаження, яке обумовлено наявністю плазми, на радіотехнічні характеристики ВЧ системи в торсатроні U-2M. Дисертантом були розроблені і протестовані ВЧ генератори Каскад-1 і Каскад-2, які призначені для створення і нагріву плазми в стелараторах. Наведено особливості вимірювань параметрів ВЧ пристроїв, які використовуються на стелараторах U-2M і U-3M. Розроблено та впроваджено метод ослаблення гармонік в лініях передачі ВЧ потужності в антену. Також для зменшення часу формування і стабільності виникнення щільної плазми запропоновано попередньо проводити іонізацію газів (отримати плазму низької щільності) за допомогою генератора Каскад-0, що детально досліджено і успішно апробовано на U-3M.

У третьому розділі представлені результати досліджень дегазації вакуумної камери U-2M за допомогою ВЧ розрядів. Для цього був розроблений генератор УКХ (частота вище іонно-циклотронного резонансу - 130 МГц, потужність-до 2 кВт), який був навантажений рамковою антеною. Антена дозволяла порушувати повільну хвилю, загасання якої викликано зіткненнями електронів з нейтральним газом. Експерименти проводилися в широких діапазонах стримуючого магнітного поля і тиску. В якості робочих газів, якими заповнювали камеру U-2M, використовувалися водневі, азотні і воднево-азотні суміші. Показано, що ефективність очищення в атмосфері гелію при комбінованому УКХ-ВЧ розряді в 2-2,5 рази вище, ніж в разі використання тільки імпульсного ВЧ розряду. Причиною цього ефекту вказано факт того, що ВЧ розряд може підтримуватися відносно високим тиском нейтрального газу.

Дисертантом розроблена і впроваджена методика контролю очищення вакуумної камери U-2M. За цією методикою в патрубку вакуумної системи, Який приєднаний до одного з вакуумних насосів, розміщують ємність, яка може використовуватися в якості кріогенної пастки. Простір патрубка, в якому розташована ємність, обмежують вакуумними клапанами. При відкритих клапанах на поверхні ємності, яку заповнюють рідким азотом, протягом певного часу відбувається конденсації газів. Після цього клапана закриваються, ємність продувається гарячим повітрям, внаслідок чого в обмеженому просторі зростає тиск, величина якого служить характеристикою ступеня очищення камери.

Протягом процесу плазмового очищення вимірювалися щільність (за допомогою Ленгмюрівського зонда) і температура електронів (за допомогою Ленгмюрівського зонда і ліній серії Фулхера).

У четвертому розділі викладено теоретичне обґрунтування та результати експериментального дослідження розробленого способу пригнічення потоків електронів-утікачів шляхом подавання постійного потенціалу на електрод – ВЧ антену. Поведінку ЕУ діагностували по синхротронному випромінюванню (на частоті 60 ГГц), струму електронів (вимірюваному за допомогою пояса Роговського) і жорсткому рентгенівському

випромінюванню. При зменшенні напруги ВЧ антени до -100 В, розташованої в камері U-3M, зареєстровано зникнення потоку ЕУ.

Представлені результати дослідження впливу ЕУ на параметри плазми в U-2M. Було виявлено затримку сигналу випромінювання лінії водню H_α при підключеному потенціалі пригнічення приблизно на 1 мс. Також виявлено, що сигнал м'якого рентгенівського випромінювання з плазми за наявності потоку ЕУ приблизно вдвічі вище, ніж у разі пригнічення цього потоку.

Також проведені експерименти із стимулювання потоків ЕУ на U-3M. Посилення потоку було отримано при подачі імпульсу-стимулятора частотою 2,45 ГГц (електронно-циклотронний резонанс), потужністю 0,5-1 кВт, який включається в момент досягнення магнітного поля величини 0,8 кЕ на час від 50 мс до 1000 мс. При цьому створювалася плазма з величиною густини близько $5 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$.

У Висновках автор чітко формулює основні результати, які вперше отримані при виконанні дисертації.

Усі розділи є взаємопов'язаними і спрямованими на досягнення поставленої мети та вирішення задач дисертації. Стиль викладення матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій у дисертації та авторефераті відповідає науковим нормам і адекватно передає зміст роботи.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі, забезпечений правильним використанням ясних наукових інтерпретацій, правильним методичним та методологічним підходом, використанням адекватних методів дослідження та інтерпретації результатів. Наукові завдання, які були поставлені дисертантом, виконані у повному об'ємі на високому науковому рівні. Дисертаційне дослідження відповідає паспорту наукової спеціальності 01.04.08-фізика плазми.

Наукові положення та висновки, подані у дисертаційній роботі, є достатніми і належним чином обґрунтованими.

Оцінка новизни та достовірності результатів.

У дисертаційній роботі отримано низку нових, цікавих та практично важливих результатів, частина з яких отримана вперше у світі, а саме:

- Вперше досліджено вплив квазістаціонарного електричного поля на виникнення та розвиток потоку ЕУ в стелараторах U-2M та U-3M. Показана можливість керування потоком ЕУ завдяки подачі постійного потенціалу на ВЧ антену.
- Для надійності виникнення основного розряду у торсатронах та стабільної повторюваності параметрів плазми вперше запропоновано проводити попередню іонізацію ВЧ випромінюванням, що з успіхом апробовано на U-3M.
- Вперше експериментально досліджені розряди в стелараторах U-2M та U-3M, які створені як безперервним випромінюванням з частотою вище ІЦР,

так і суперпозицією цих полів з полями імпульсного випромінювання від ВЧ джерел Каскад. Показана придатність таких розрядів для очищення камери і доцільність застосування їх для установок з надпровідними котушками магнітного поля.

- Розроблена, апробована і включена в дослідницький процес серія оригінальних вч пристроїв. Вперше на U-2M експериментально вивчено взаємодію плазми з ВЧ системою, що генерує електромагнітні поля, які створюють саму плазму. Визначено вплив плазми на робочі характеристики ВЧ обладнання, що дозволило провести пригнічення несприятливих гармонік та підвищити ефективність передачі ВЧ потужності від генератора до плазми.
- Розроблено та апробовано оперативний спосіб визначення динаміки очищення вакуумної камери із застосуванням кріогенної пастки.

Повнота викладу результатів роботи в опублікованих працях.

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.

Кількість публікацій за темою дисертації є достатньою та відповідає вимогам МОН України щодо публікацій здобувачів наукового ступеня кандидата наук.

Зауваження по дисертаційній роботі в цілому.

Незважаючи на безсумнівну позитивну оцінку дисертаційної роботи при знайомстві з роботою виникло ряд зауважень, головним чином, редакторського спрямування:

1. У дисертації є ряд помилкових посилань або ж такі відсутні:
   а) немає вказівки на те, що література в пункті Публікації Вступу наводиться за додатком 1;
   б) на сторінках з 86 по 89 даються посилання на рис. 2.8, а необхідно було б давати посилання на рис. 3.4;
   в) замість посилання на рис. 2.5 (стор. 91) потрібно було давати посилання на рис. 3.5;
   г) замість посилання на [140] (стор. 92), можливо, потрібно було дати посилання на [133];
   д) можливо замість посилання на [133] (стор. 95) потрібно було посилатися на [135];
   е) немає роз'яснень до елементів схеми, яка наводиться на рис. 2.9 (стор. 55).
2. У тексті дисертації замість «ємності антени» часто вживається вираз «конденсатор антени».

3. Є недоліки при роботі з формулами:
   а) в розділах 1, 2 і 3 відсутня нумерація формул;
   б) праві частини формул для напруги і струму (стор. 60) мають одну і ту ж розмірність.
4. Є ряд зауважень до оформлення рисунків:
   а) Підпис до рис. 2.4 (стор. 48) "Принцип визначення опору ВЧ контуру при его навантаженні при створенні плазми [106]" могла б носити більш коректний характер;
   б) незрозуміло, для яких величин вказані значення на осі ординат рис. 4.5 (стор. 116);
   в) некоректна підпис до рис. 2.7 (стор. 51) " Залежність $I_{a.xx}$ /$I_{a.L}$ від гвинтового поля при початковій величині $B_{тор}$=0.05 Тл [107]" так як на осі абсцис наведені значення струму в обмотці.
5. Дві частини рис. 3.7 (стор. 93) дублюють залежність концентрації електронів, хоча цей малюнок має назву " Залежність густини і температури електронів в УКХ розряді від напруженості магнітного поля [134]". Викликає сумніви інтервал значень **індукції** магнітного поля $(1.6 - 8) \cdot 10^{-8}$ Тл, вказаний на цьому рисунку.
6. На стор. 74 наводиться висловлювання " Для більш високих гармонік його опір зменшується і ФРК (*фільтруючий резонансний контур*) поглинає частину їх потужності ", але не пояснюється механізм поглинання потужності.
7. На стор. 113 сказано, що " Він (*электрон*) не отримує енергію від вихорового електричного поля і не бере участі в процесі лавиноутворення ". Чи не суперечить це висловлювання наявності не тільки паралельної (що враховано в моделі формулою (4.2) на стор. 111), але і перпендикулярної складової (участь якої в моделі не враховується) вихрового електричного поля (по відношенню до напрямку магнітної індукції).
8. У тексті дисертації виявлена деяка кількість друкарських помилок,
   граматичних і стилістичних похибок.

Однак вказані недоліки не знижують загальної високої оцінки дисертаційної роботи, виконаної на найвищому науковому рівні.

Висновок.

Дисертаційна робота «Застосування високочастотних джерел електромагнітних полів у стелараторах Ураган» є закінченою самостійною науковою роботою, в якій здобуто нові теоретичні та експериментальні результати та зроблено чіткі висновки, що мають цінність для подальшого проведення нових теоретичних та експериментальних досліджень. Зміст дисертаційної роботи повністю відповідає науковій спеціальності 01.04.08 - фізика плазми. Автореферат повною мірою відбиває зміст дисертаційної роботи. Автореферат та дисертація

оформлені згідно вимог Атестаційної колегії Міністерства освіти та науки України.

За обсягом проведених досліджень, їх високим рівнем, науковою новизною та практичною цінністю здобутих результатів дисертаційна робота Коровіна Валерія Борисовича «**Застосування високочастотних джерел електромагнітних полів у стелараторах Ураган**» відповідає всім вимогам Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року (зі змінами, внесеними постановами Кабінету міністрів № 656 від 19 серпня 2015 року, № 1159 від 30 грудня 2015 року, № 567 від 27 липня 2016 року, № 943 від 20 жовтня 2019 року, № 607 від 15 липня 2020 року), які висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми.

Офіційний опонент доцент кафедри фізики
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»,
кандидат фізико-математичних наук В.І. Федун

Підпис Федуна В.І.

ЗАСВІДЧУЮ
НАЧ. ЗАГАЛЬНОГО
ВІДДІЛУ
Т.О. ЗА[illegible]ЕНКО
28.12.2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД «ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 02070812