Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету
імені В. Н. Каразіна
професору Ігорю ГІРЦІ
майдан Свободи 4,
м. Харків, 61022

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента, професора кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Навчально-наукового інституту «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, доктора фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.08 – фізика плазми) Зикова Олександра Володимировича на дисертаційну роботу Волкової Юлії Євгенівни «Динаміка плазмового потоку, що генерується магнітоплазмовим компресором із поздовжнім магнітним полем», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» з галузі знань 10 – «Природничі науки».

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Потреби сучасних науки та техніки диктують необхідність дослідження перспективних модифікацій плазмових прискорювачів і просування нових технологій на їхній основі. Плазмові прискорювачі використовуються при розробці нових технологій модифікації матеріалів, у термоядерних дослідженнях, у космосі як плазмові двигуни корекції орбіти, а також як потужні джерела різного випромінювання. Зокрема магнітоплазмовий компресор, на якому проведено дослідження за темою дисертації Ю.Є. Волкової, розглядається як перспективне джерело випромінювання вакуумного ультрафіолету при роботі на ксеноні, що могло б використовуватися для літографії при виробництві найсучасніших мікросхем. Використання додаткового магнітного поля в магнітоплазмовому компресорі може розширити

діапазон параметрів плазми, а також виявити загальні фізичні закономірності, що сприятиме створенню єдиної картини динаміки плазмових потоків у зовнішньому магнітному полі. Дисертація Волкової Юлії Євгенівни присвячена дослідженню впливу зовнішнього поздовжнього магнітного поля в розрядному каналі магнітоплазмового компресора на динаміку плазмового потоку, що генерується. У дисертації було показано, що зовнішнє магнітне поле можна застосовувати з метою збільшення компресійних характеристик само-стисненого плазмового потоку, що значно розширює коло перспективних застосувань цього пристрою. Зважаючи на вищезазначене, можна стверджувати, що дисертація Волкової Юлії Євгенівни є **повністю актуальною**, а її результати **є важливими** для майбутніх досліджень різноманітних плазмодинамічних систем.

Загальна характеристика дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота виконана в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна та Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут». Дисертаційна робота складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, 4 розділів, висновків та переліку використаної літератури, який містить 122 найменування. Загальний обсяг роботи складає 150 сторінок. Робота ілюстрована 57 рисунками та 2 таблицями.

У вступі наведено обґрунтування вибору теми, визначено мету й завдання дослідження, його об’єкт та предмет, методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувачки при виконанні дослідження, наведено перелік наукових публікацій за темою дисертації та інформацію стосовно апробації матеріалів дисертації, встановлено зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

У **першому розділі** проведено літературний аналіз, присвячений огляду теоретичних та експериментальних напрацювань стосовно коаксіальних плазмодинамічних систем, у тому числі тих, що оснащені системами додаткового магнітного поля. При написанні використано відповідні темі

наукові джерела, більшість із яких це оригінальні сучасні статті, що відповідає вимогам до оформлення дисертації.

У **другому розділі** дисертації наведено опис експериментального стенду магнітоплазмовий компресор, зокрема геометрії розрядного каналу, конструкції соленоїда магнітного поля, типових параметрів розряду.

У **третьому розділі** розглянуто використані в дисертації зондові методи діагностики плазми. Описано конструкцію, вимірювальні схеми та методи калібрування магнітних та електричних зондів. Представлено результати визначення режиму роботи подвійного електричного зонда в умовах компресійного плазмового потоку МПК, проаналізовано обмеження такого застосування та способи зменшення похибок вимірювання.

У **четвертому розділі** представлено результати дисертаційної роботи: вимірювання розрядних характеристик МПК за різних початкових умов, вимірювання просторового розподілу власного магнітного поля в плазмовому потоці, електронної температури та електричного поля. Побудовано просторові розподілу електричного струму, швидкості дрейфу, електричного потенціалу та сили Ампера в плазмовому потоці на основі зондових вимірювань. Досліджено вплив зовнішнього магнітного поля на динаміку плазмового потоку, розмір та розташування зони стиснення, описано виявлену в плазмовому потоці структуру, що є подібною до нейтрального струмового шару.

У **висновках** стисло наведено основні результати, які повністю відповідають змісту роботи**. Список використаних джерел** містить посилання на відповідні літературні та власні публікації за темою дисертації. До кожного розділу також наведено висновки, що підсумовують основні положення. Усе це вказує на завершеність цієї роботи.

Наукова новизна полягає у таких основних результатах:

1) Уперше проведено вимірювання вольт-амперних характеристик розряду МПК із зовнішнім поздовжнім магнітним полем.

2) Встановлено, що зовнішнє магнітне поле в розрядному каналі МПК приводить до значного зростання електронної температури в компресійному плазмовому потоці; уперше виявлено наявність двох популяцій електронів із різними температурами.
3) Уперше продемонстровано, що зовнішнє магнітне поле приводить до збільшення об'єму зони стиснення, зміни просторового розподілу електричного струму, зменшення кількість струмових вихорів та зростання радіальної складової сили Ампера, що вказує на більш ефективну реалізацію режиму компресії.
4) Уперше виявлено, що в плазмовому потоці відбувається формування структури, яка є подібною до нейтрального струмового шару. Аналіз експериментальних результатів вказує на те, що зі струмового шару витікає електронний пучок або плазмовий струмінь.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Аналіз тексту дисертації та змісту публікацій Волкової Ю.Є. дає змогу зробити висновок, що результати є науково обґрунтованими, достовірними та відповідають меті й завданням дисертаційної роботи. Достовірність та обґрунтованість наукових результатів і висновків дисертаційної праці не викликає жодних сумнівів і забезпечується високим рівнем апробації та наукових видань, у яких опубліковано результати дослідження.

Апробація та публікації.

Основні результати роботи оприлюднені та обговорені **на 8 конференціях**: International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, International Conference on research and applications of plasmas PLASMA-2019, Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу-2019, 15th Kudowa Summer School "Towards Fusion Energy", XV International Conference "Plasma Electronics and New Acceleration Methods", XVII International Scientific Conference Electronics and Applied Physics, 16th Kudowa

Summer School “Towards Fusion Energy”, 48th European Physical Society Conference on Plasma Physics.

Результати дисертації повністю висвітлено в **6 наукових статтях** у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.

Оформлення дисертації та академічна доброчесність.

Оформлення, зміст, структура дисертації та кількість публікацій **відповідають вимогам** «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. №40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

На підставі детального розгляду тексту дисертації, посилань, статей здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку можливої наявності текстових запозичень виконано в інтернет-системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що дисертаційна робота **виконана самостійно**, текст дисертації **не містить плагіату**, а дисертація **відповідає усім вимогам академічної доброчесності**.

Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

Результати щодо покращення компресійних властивостей плазмового потоку в МПК із зовнішнім магнітним полем мають велике практичне значення, оскільки вони визначають ефективність застосування такої плазмодинамічної системи в плазмових технологіях різного призначення, а також як джерела вакуумного ультрафіолету для літографії нового покоління, дослідження взаємодії плазми з поверхнями різних матеріалів в умовах, наближених до термоядерного реактора. Виявлення в плазмовому потоці структури, подібної до нейтрального струмового шару, має фундаментальне значення для розуміння динаміки плазмових потоків та відкриває нові можливості для подальших досліджень.

Оцінка змісту дисертації та її завершеності.

Дисертація Ю.Є. Волкової є завершеною науково-дослідною роботою, у якій вирішено комплексну задачу, пов’язану з дослідженням динаміки плазмового потоку, що генерується квазістаціонарною плазмодинамічною системою з поздовжнім магнітним полем у розрядному каналі. Результати досліджень повністю висвітлені в наукових публікаціях, матеріалах конференцій та відображені в змісті дисертації.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.

1. У тексті (стор. 56, 62) трапляється фраза «залишковий робочий газ», натомість доречніше було б писати просто «робочий газ».
2. У дисертації зроблено висновок про вплив геометрії розрядного каналу МПК на динаміку потоку, проте немає пояснення впливу, наприклад, вакуумної камери.
3. У роботі зроблено висновок про покращення компресійних характеристик потоку, що важливо для прикладних застосувань, зокрема літографії, але не зазначено, як саме зміниться інтенсивність випромінювання при застосуванні зовнішнього магнітного поля.
4. Для розрахунку розподілу зовнішнього магнітного поля соленоїда, на мою думку, зручніше використовувати спеціалізовані програмні пакети. Разом із тим, наведені графіки розподілу, отримані з розрахунків, є досить достовірними.
5. Деякі фотографії низької якості.

Наведені зауваження жодним чином не зменшують якість дисертації та обґрунтованість висновків.

Загальні висновки.

Дисертація Волкової Юлії Євгенівни є завершеною науково-дослідною роботою, має наукову новизну та практичну значимість. Зміст повністю відображає основні наукові положення дисертації. Дисертація оформлена відповідно до чинних вимог, написана науковим стилем і літературною українською мовою.

Дисертаційна праця Волкової Юлії Євгенівни «Динаміка плазмового потоку, що генерується магнітоплазмовим компресором із поздовжнім магнітним полем» за актуальністю, змістом та повнотою викладу її результатів у публікаціях здобувача, обсягом і якістю оформлення відповідає спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали», вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

Вважаю, що Волкова Юлія Євгенівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний рецензент,
доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри матеріалів
реакторобудування та фізичних технологій
ННІ «Фізико-технічний факультет»
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна Олександр ЗИКОВ

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 14:56:42 29.09.2023

Назва файлу з підписом: Рецензія_Зиков-1.pdf
Розмір файлу з підписом: 150.0 КБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: Рецензія_Зиков-1.pdf
Розмір файлу без підпису: 112.6 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ЗИКОВ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ
П.І.Б.: ЗИКОВ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ
Країна: Україна
РНОКПП: 2105000898
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 14:56:44 29.09.2023
Сертифікат виданий: АЦСК АТ КБ «ПРИВАТБАНК»
Серійний номер: 248197DDFAB977E5040000003CC4110114B04904
Алгоритм підпису: ДСТУ-4145
Тип підпису: Удосконалений
Тип контейнера: Підпис PDF-файла (PAdES)
Формат підпису: З позначкою часу від ЕП (PAdES-B-T)
Сертифікат: Кваліфікований

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету
імені В. Н. Каразіна
професору Ігорю ГІРЦІ
майдан Свободи 4,
м. Харків, 61022

Відгук

офіційного опонента, кандидата фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.04 – фізична електроніка), старшого наукового співробітника Інституту фізики Національної академії наук України, Ціолко В'ячеслава Володимировича на дисертаційну роботу Волкової Юлії Євгенівни «Динаміка плазмового потоку, що генерується магнітоплазмовим компресором із поздовжнім магнітним полем», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» з галузі знань 10 – «Природничі науки».

Обґрунтування вибору теми дослідження. Щільні високоенергетичні плазмові потоки (густина енергії до десятків кДж/см^2 при енергіях часток ~ одиниць кеВ та тривалостях від десятків до сотень мікросекунд) в останні десятиліття знаходять широке застосування в науці та при розробці нових технологій. Вони використовуються для дослідження особливостей взаємодії плазмо-поверхня (зокрема для моделювання взаємодії високотемпературної плазми з елементами конструкції термоядерного реактора), при створенні ефективних джерел часток та ВУФ випромінювання, моделювання процесів в сонячній короні тощо.

Одним з представників пристроїв для генерації потужних квазістаціонарних плазмових потоків є магнітоплазмові компресори (МПК). Основне стиснення/компресія плазми в МПК відбувається за рахунок взаємодії струмів, які протікають в плазмі з власним азимутальним магнітним полем плазмового потоку. Для покращення енергетичних параметрів існуючих систем зі стисненням власним магнітним полем, необхідно збільшувати розрядний струм. Однак, це призводить до так званої «кризи струму, яка унеможливлює підвищення струму вище певної величини навіть у випадку використання «прозорих» електродів. Можливим варіантом одержання плазмових потоків з

більш високими параметрами є використання додаткового зовнішнього повздовжнього поля.

Дисертація Волкової Юлії Євгенівни саме і присвячена дослідженню впливу поздовжнього магнітного поля на динаміку плазмового потоку, що генерується магнітоплазмовим компресором. У роботі отримано просторові розподіли електричних струмів, магнітних полів, електромагнітної сили та температури електронів в потоці плазми, що є фундаментальним завданням плазмодинаміки. Це є вкрай ***актуальним***, оскільки надає основну інформацію про формування компресійних плазмових потоків під дією поздовжнього магнітного поля, що в подальшому необхідно враховувати для технологічного застосування таких розрядних систем (зокрема у літографії).

Загальна характеристика дисертаційної роботи. Робота дисертантки виконана в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна та ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут». Дисертація анотована двома мовами, містить вступ, 4 розділи, висновки та список джерел використаної літератури, який складає 122 найменування. У роботі наведено 57 рисунків та 2 таблиці. Загальний обсяг роботи складає 150 сторінок.

Розділ 1 присвячено аналізу наукової літератури, і у якому обговорюються фізичні засади роботи коаксіальних плазмових пристроїв, у тому числі з використанням зовнішнього поздовжнього магнітного поля. Серед використаних джерел є як сучасні наукові статті, так і фундаментальні роботи минулих десятиліть, що робить огляд досить вичерпним.

У ***розділі 2*** представлено детальний опис експериментальної установки: конструкція електродної системи, соленоїда магнітного поля та його параметри, система відкачки та діагностичне обладнання.

Розділ 3 містить опис діагностики для визначення основних параметрів плазми. Надано вичерпну інформацію про системи магнітних, електричних та подвійних електричних зондів. Описано методику перевірки аксіальної симетрії плазмового потоку та впливу взаємного розташування вимірювальних зондів один на одного та на параметри плазмового потоку. Зокрема, за допомогою подвійних зондів Ленгмюра було проведено оцінки електронної температури, і було показано, що за відсутності зовнішнього магнітного поля функція розподілу електронів по енергіях у плазмовому потоці є близькою до максвелівської.

В ***Розділі 4*** представлено результати експериментальних досліджень впливу зовнішнього поздовжнього магнітного поля на вольт-амперні характеристик МПК, просторово-часові розподіли власного магнітного поля, електричного струму, швидкості дрейфу, електричного потенціалу, сили Ампера та електронної температури в плазмовому потоці.

У ***висновках*** представлено найважливіші аспекти дисертації. Висновки подано структуровано, змістовно, лаконічно та достовірно, що свідчить про високий рівень наукової праці.

Найважливішими науковими результатами, що містяться в дисертації, є такі:

1. Уперше встановлено вплив зовнішнього поздовжнього магнітного поля на розрядні характеристики МПК при різних початкових умовах.
2. Уперше встановлено особливості впливі зовнішнього поздовжнього магнітного поля в каналі МПК на розподіл власного магнітного поля, електричного струму, швидкості дрейфу та електромагнітних сил у плазмовому потоці поза межами розрядного каналу.
3. Експериментально встановлено особливості просторового розподілу електронної температури в потоці компресійної плазми у випадку використання зовнішнього повздовжнього магнітного поля. Уперше встановлено можливість існування в плазмовому потоці двох груп електронів із різними температурами.
4. Уперше встановлено вплив зовнішнього повздовжнього магнітного поля на компресійні властивості плазмового потоку, що генерується МПК. Показано, що застосування такого поля призводить до зростання розміру зони стиснення, збільшення сили Ампера поблизу зони стиснення щонайменше втричі, зменшення в плазмовому потоці кількості струмових вихорі. Усе це, разом зі зростанням електронної температури, свідчить про значне збільшення ефекту стиснення.
5. Уперше виявлено та описано структуру, подібну до нейтрального струмового шару, що утворюється в плазмовому потоці.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Головні положення дисертації Ю.Є. Волкової є добре обґрунтованими та достовірними. Робота містить достатній об’єм експериментального матеріалу, отриманого при комплексному підході до вимірювань з використанням надійних методів діагностики плазми, порівнянні

отриманих результатів із результатами інших дослідників та попередніми результатами колективу співавторів.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертацію виконано в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна відповідно до тематичних планів фундаментальних науково-дослідних робіт:

1 Грант "Pauli Ukraine Project", WPI Thematic Program "Mathematics-Magnetism-Materials" (2021/2022)".

2 Тема міжнародного співробітництва Міністерства освіти та науки України із Австрією (2023-2024): «Моделювання взаємодії електромагнітних полів з плазмою в установках керованого термоядерного синтезу та відпрацювання експериментальних діагностик цієї взаємодії».

Дослідження за темою дисертації також проводилися в Інституті фізики плазми Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» відповідно до тематики науково-дослідних робіт:

1 Цільова програма наукових досліджень НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій». Тема «Динаміка потоків, що стискаються, за межами прискорювального каналу, та їх вплив на різні поверхні», № держреєстрації 0117U001772, 2017-2019.

2 Цільова програма наукових досліджень НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій». Тема «Формування зони стиснення в плазмовому потоці зі зовнішнім поздовжнім магнітним полем у прискорювальному каналі», № держреєстрації 0120U102922, 2020-2022.

3 Дослідження в рамках конкурсу проєктів науково-дослідних робіт (НДР) молодих учених НАН України. Тема «Вплив зовнішнього поздовжнього магнітного поля на розподіли магнітного поля й струмів у компресійних потоках плазми», № держреєстрації 0121U111843, 2021-2022.

4 Теми міжнародного співробітництва Міністерства освіти та науки України із Польщею М/122-2020, М/122-2021: «Features of constructional materials modifications by powerful plasma streams».

5 Програма EUROfusion Consortium Euratom research and training programme 2014-2020, grant agreement No 633053.

6 Програма Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No. 101052200 – EUROfusion).

7 Грант від Simons Foundation, програма Presidential Discretionary-Ukraine Support Grants 2023-2024, тема «Analysis of critical issues of plasma-surface interaction in fusion devices».

Оформлення дисертації та академічна доброчесність. Оформлення дисертації ***повністю відповідає вимогам*** «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. №40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації». Стиль викладу матеріалу науковий, логічний, виважений та зрозумілий.

Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

Результати роботи, пов'язані з дослідженням характеристик потоку, зокрема виявлення струмової структури (ймовірно, нейтрального струмового шару), дозволить у подальшому розширити знання про процес перез'єднання магнітних силових ліній. Виявлене збільшення розміру зони стиснення під час застосування зовнішнього повздовжнього магнітного поля потенційно може означати зростання інтенсивності випромінювання, що було б суттєвим досягненням у напрямі розвитку джерел екстремального ультрафіолету. Високоенергетичні потоки плазми з отриманими в дисертації параметрами можуть використовуватись при дослідженні особливостей взаємодії плазми з поверхнями різних матеріалів, зокрема при моделюванні взаємодії термоядерної плазми з внутрішніми елементами пристроїв для проведення термоядерного синтезу.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації. Завдання дисертації виконані в повному обсязі. Принципових і суттєвих зауважень до роботи немає, усі розділи були оцінені позитивно. У межах наукової дискусії хотілося б додати такі зауваження:

1 У розділі 4 дисертації при описі процедури вимірювання вольт-амперних характеристик розряду зазначено, що залежність індуктивності від часу є незначною. Скоріш за все, це відповідає дійсності, проте в роботі не наведено хоч якісь оцінки спаду напруги та індуктивності розряду й плазми.

2 У розділі 4 вказано, що «оскільки вимірювання на радіусах менше 1 см є ускладненими, дані для приосьової області потоку були екстрапольовані для деяких випадків, де це було необхідно». Оскільки приосьовій зоні потоку в

роботі приділяється найбільше уваги (зокрема виявлено структури, подібні до нейтрального струмового шару), то від обраного методу/методів дослідження цієї зони залежить точність результатів, що може вплинути на коректність інтерпретації отриманих експериментальних результатів. Хотілось би більш детально дізнатись про використані методи.

3 Декілька зауважень щодо оформлення тексту дисертації:

- дуже незручно, коли підписи під рисунками неповні – приходиться витрачати час на пошуки в тексті дисертації;
- рис. 3.14 – невдалий масштаб по осі Ln(I) – незручно використовувати цей рисунок;
- рис. 4.8 – яка величина зовнішнього магнітного поля?.

Зазначені зауваження жодним чином не впливають на загальну позитивну оцінку результатів дисертації та зроблених висновків.

Загальні висновки. Дисертація Волкової Юлії Євгенівни на тему «Динаміка плазмового потоку, що генерується магнітоплазмовим компресором із поздовжнім магнітним полем» є завершеною науковою роботою, що виконана на високому рівні.

Дисертаційна праця Волкової Юлії Євгенівни повністю відповідає спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали», вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

Вважаю, що Волкова Юлія Євгенівна ***заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії*** з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Інституту фізики НАН України
Старший науковий співробітник В’ячеслав ЦІОЛКО

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 18:43:31 06.10.2023

Назва файлу з підписом: Відгук на дис. Волкової Ю.Є. опон. Ціолко В.В..pdf
Розмір файлу з підписом: 490.6 КБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: Відгук на дис. Волкової Ю.Є. опон. Ціолко В.В..pdf
Розмір файлу без підпису: 466.7 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ЦІОЛКО В'ЯЧЕСЛАВ ВОЛОДИМИРОВИЧ
П.І.Б.: ЦІОЛКО В'ЯЧЕСЛАВ ВОЛОДИМИРОВИЧ
Країна: Україна
РНОКПП: 1983801115
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 18:40:24 06.10.2023
Сертифікат виданий: АЦСК АТ КБ «ПРИВАТБАНК»
Серійний номер: 248197DDFAB977E5040000009CB81101408B4904
Алгоритм підпису: ДСТУ-4145
Тип підпису: Удосконалений
Тип контейнера: Підпис PDF-файла (PAdES)
Формат підпису: З позначкою часу від ЕП (PAdES-B-T)
Сертифікат: Кваліфікований

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету
імені В. Н. Каразіна
професору Ігорю ГІРЦІ
майдан Свободи 4,
м. Харків, 61022

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента, професора кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Навчально-наукового інституту «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, доктора фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.08 – фізика плазми) Лісовського Валерія Олександровича на дисертаційну роботу Волкової Юлії Євгенівни **«Динаміка плазмового потоку, що генерується магнітоплазмовим компресором із поздовжнім магнітним полем»**, подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» з галузі знань 10 – «Природничі науки».

Обґрунтування вибору теми дослідження

Потоки стисненої плазми, що генеруються пінчевими розрядами, розглядаються як перспективне джерело ВУФ, що випромінюється замагніченою плазмою, для різних технологічних застосувань. Зокрема гаряча плазма пінчевих розрядів може бути використана для застосування в літографії, а також для розробки генераторів гарячої плазми та для технологій модифікації матеріалів на основі плазмової обробки. Для літографії на наступному етапі розглядається використання інтенсивного ВУФ випромінювання від ксенонової або олов'яної плазми з довжиною хвилі 13,5 нм. Серед ключових питань для наступного кроку досліджень і розробок літографії є оптимізація динаміки плазмового потоку, особливо його зони зі стисненням, спрямована на досягнення необхідної енергії та уникнення значної ерозії поверхонь електродів.

Особливий інтерес для зазначених застосувань становлять коаксіальні соплові прискорювачі із власним магнітним полем, оскільки вони здатні генерувати квазістаціонарні високоенергетичні потоки плазми. Більше того, такі розрядні пристрої, оснащені системами додаткового магнітного поля, широко використовуються для моделювання умов, що виникають на пластинах дивертора термоядерного реактора ІТЕР під час перехідних процесів.

Дисертація Волкової Юлії Євгенівни присвячена виявленню загальних особливостей впливу поздовжнього магнітного поля, що застосовано в розрядному каналі сильнострумового магнітоплазмового компресора (МПК), на динаміку самостисненого плазмового потоку. Значна увага приділяється вивченню процесів формування зони стиснення та визначенню її параметрів.

Дослідження таких компресійних плазмових потоків великої густини є цікавим і важливим як з точки зору розвитку фундаментальних принципів фізики плазми, так і з точки зору необхідності подальшого розвитку технологій та техніки експерименту в цій галузі.

Таким чином, дисертаційна робота Волкової Юлії Євгенівни є **цілком актуальною** та **потрібною**.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаної літератури (122 найменування). Загальний обсяг роботи складає 150 сторінок, основного тексу – 110 сторінок, що відповідає вимогам до дисертації на здобуття ступеня доктора філософії.

Перший розділ присвячено огляду теоретичних моделей та експериментальних досліджень течії плазми, що генерується квазістаціонарними сильнострумовими плазмовими системами із власним магнітним полем різних конструкцій. Повнота проведеного аналізу результатів, отриманих іншими дослідниками, показує високий рівень обізнаності авторки з науковою літературою.

У **другому розділі** подано детальний опис експериментальної установки магнітоплазмовий компресор: прискорювального каналу та загальних характеристик розряду, параметрів соленоїда магнітного поля, наявного діагностичного обладнання.

У **третьому розділі** вичерпно викладено опис основних параметрів застосованих зондових діагностик, а саме магнітних, електричних та подвійних електричних зондів. Розглянуто питання застосовності подвійного електричного зонду в типових умовах компресійного плазмового потоку для вимірювання електронної температури, наявні проблеми такого підходу. Наведено опис калібрування зондів, пояснено методику перевірки відсутності взаємного впливу та аксіальної симетрії потоку.

У **четвертому розділі** дисертації висвітлено отримані нові наукові результати дисертаційної роботи з визначення впливу зовнішнього поздовжнього магнітного поля на динаміку компресійного потоку плазми. За допомогою побудованих просторових розподілів магнітного поля, електричного струму, швидкості дрейфу, електронної температури проведено детальний аналіз динаміки плазмового потоку при застосуванні зовнішнього магнітного поля в розрядному каналі.

У **висновках** стисло, логічно, та послідовно викладено основні отримані в роботі результати. Список використаних джерел містить посилання на відповідні наукові роботи, що опубліковані в спеціалізованих виданнях, та на власні публікації авторки за темою дисертації.

Найважливіші наукові результати та новизна

Серед основних результатів цієї роботи слід відзначити такі:

— уперше виконано вимірювання основних розрядних характеристик МПК за наявності поздовжнього магнітного поля в каналі. Зокрема виявлено особливості впливу як магнітного поля, так і конструкції з соленоїдом;

- уперше показано, що зовнішнє магнітне поле в розрядному каналі МПК має істотний вплив на компресійні характеристик плазмового потоку, зокрема на електронну температуру та радіальну складову електромагнітної сили в приосьовій зоні потоку. Окрім цього, принципово новим результатом є виявлення наявності двох популяцій електронів із різними температурами поблизу зони стиснення при застосуванні магнітного поля;
- уперше детально досліджено зміни в просторовій структурі плазмового потоку за розрядним каналом при застосуванні поздовжнього магнітного поля в каналі. Встановлено, що зменшується кількість струмових вихорів, змінюється розподіл електричного потенціалу;
- ще унікальний результат – у плазмовому потоці виявлено структуру, яка за ознаками є подібною до нейтрального струмового шару. Результати вказують на можливу генерацію електронного пучка зі структури з шаром.

Ступінь обґрунтованості положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Основні результати є новими, добре обґрунтованими та проаналізованими. Достовірність результатів, отриманих Ю.Є. Волковою, не викликає сумнівів. Обґрунтованість та достовірність наукових результатів забезпечуються використанням фундаментальних підходів та комплексу сучасних методів діагностики плазми, аналізом умов їх застосування, аналізом контексту сучасних наукових поглядів на певну проблему та порівнянням отриманих результатів із результатами інших робіт за тематикою дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані у фахових наукових журналах та доповідалися на міжнародних конференціях. Висновки дисертаційної роботи є обґрунтованими.

Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Використання отриманих в дисертаційній роботі результатів дозволяє оптимізувати квазістаціонарні магнітоплазмові компресори для отримання плазмових потоків з параметрами, близькими до теоретичних меж. Встановлені закономірності динаміки плазми при застосуванні зовнішнього магнітного поля дозволяють підвищити ефективність використання компресійних потоків плазми для моделювання процесів на першій стінці і пластинах дивертора термоядерного реактора, для отримання випромінювання із зони стиснення в діапазоні довжин хвиль ВУФ, що важливо для застосування в літографії.

Оформлення дисертації та академічна доброчесність

Оформлення повністю **відповідає** вимогам наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. №40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації». Текст дисертації написаний українською мовою в науковому стилі.

На підставі розгляду Протоколу контролю оригінальності (перевірки можливої наявності текстових запозичень виконано в інтернет-системі Strikeplagiarism.com) та аналізу Повного звіту встановлено, що текст дисертації **не містить плагіату**, результати є оригінальними.

Зв’язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Дисертацію виконано в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна та Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» відповідно до тематичних планів фундаментальних науково-дослідних робіт:

— Грант “Pauli Ukraine Project”, WPI Thematic Program “Mathematics-Magnetism-Materials” (2021/2022)”.

— Тема міжнародного співробітництва Міністерства освіти та науки України із Австрією (2023-2024): «Моделювання взаємодії електромагнітних полів з плазмою в установках керованого термоядерного синтезу та відпрацювання експериментальних діагностик цієї взаємодії».

— Цільова програма наукових досліджень НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій». Тема «Динаміка потоків, що стискаються, за межами прискорювального каналу, та їх вплив на різні поверхні», № держреєстрації 0117U001772, 2017-2019.

— Цільова програма наукових досліджень НАН України «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій». Тема «Формування зони стиснення в плазмовому потоці зі зовнішнім поздовжнім магнітним полем у прискорювальному каналі», № держреєстрації 0120U102922, 2020-2022.

— Дослідження в рамках конкурсу проєктів науково-дослідних робіт (НДР) молодих учених НАН України. Тема «Вплив зовнішнього поздовжнього магнітного поля на розподіли магнітного поля й струмів у компресійних потоках плазми», № держреєстрації 0121U111843, 2021-2022.

— Теми міжнародного співробітництва Міністерства освіти та науки України із Польщею М/122-2020, М/122-2021: «Features of constructional materials modifications by powerful plasma streams».

— Програма EUROfusion Consortium Euratom research and training programme 2014-2020, grant agreement No 633053.

— Програма Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No. 101052200 – EUROfusion).

— Грант від Simons Foundation, програма Presidential Discretionary-Ukraine Support Grants 2023-2024, тема «Analysis of critical issues of plasma-surface interaction in fusion devices».

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації

1) У першому розділі написано, що «для режимів роботи з азотом та аргоном максимальна густина плазми досягається на більшій відстані від поверхні електродів магнітоплазмового компресора [56]». По-перше, у роботі [56] дослідження проведено для аргона та гелія. По-друге, з наведеної фрази не зрозуміло, «на більшій відстані» у порівнянні з чим?

2) У розділі 3, де описується використання подвійного зонда під час досліджень параметрів плазми, не сказано, чи впливає якимось чином магнітне поле (як власне, так і зовнішнє) на його роботу.

3) На Рис. 3.12 наведено «типову» ВАХ подвійного електричного зонда, яка насправді дуже відрізняється від звичайних ВАХ подвійного зонда, наведених в

літературі інших авторів. Доцільно було б пояснити, які частини ВАХ відповідають іонним гілкам зі струмом насичення та перехідній ділянці.

4) У 4 розділі на сторінці написано: «Довжина вільного пробігу є істотно меншою за розмір зони стиснення, тому для цих умов величини електронної та іонної компоненти є однаковими.» З текста не зрозуміло, величини саме чого мають бути однаковими. До цього речення в абзаці мова йде як про температуру, так й густину плазми.

5) У тексті неодноразово наводиться розподіл іонного струму насичення як якісна характеристика густини плазми. Але доцільніше було б з іонного струму насичення подвійного зонда розрахувати саме густину іонів, при цьому врахувати, що зонд знаходиться у плазмі, що рухається повз нього з високою швидкістю.

Слід зазначити, що наведені зауваження не впливають на якість отриманих результатів дисертаційної роботи й на обґрунтованість висновків.

Загальні висновки

Дисертація Волкової Юлії Євгенівни є завершеним науковим дослідженням, є актуальною та важливою. Тема дисертації відповідає спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали», а її зміст та публікації – вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44).

Враховуючи актуальність, обґрунтованість наукових положень і висновків, наукову новизну та практичне значення дисертації, а також дотримання академічної доброчесності, **вважаю, що Волкова Юлія Євгенівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».**

Офіційний рецензент,
доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри матеріалів
реакторобудування та фізичних технологій
ННІ «Фізико-технічний факультет»
Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна Валерій ЛІСОВСЬКИЙ

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 22:00:21 08.10.2023

Назва файлу з підписом: Рецензія_Лісовський_Волкова.pdf
Розмір файлу з підписом: 182.9 КБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: Рецензія_Лісовський_Волкова.pdf
Розмір файлу без підпису: 144.6 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ЛІСОВСЬКИЙ ВАЛЕРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ
П.І.Б.: ЛІСОВСЬКИЙ ВАЛЕРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ
Країна: Україна
РНОКПП: 2360410555
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 22:00:11 08.10.2023
Сертифікат виданий: АЦСК АТ КБ «ПРИВАТБАНК»
Серійний номер: 248197DDFAB977E50400000020D70F01FE774304
Алгоритм підпису: ДСТУ-4145
Тип підпису: Удосконалений
Тип контейнера: Підпис PDF-файла (PAdES)
Формат підпису: З позначкою часу від ЕП (PAdES-B-T)
Сертифікат: Кваліфікований

Голові разової
спеціалізованої вченої ради
Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
професору Ігорю ГІРЦІ
майдан Свободи 4, м. Харків, 61022

Відгук

офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.08 - фізика плазми), професора, завідувача кафедри фізичної електроніки факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка Веклича Анатолія Миколайовича на дисертаційну роботу *Волкової Юлії Євгенівни «Динаміка плазмового потоку, що генерується магнітоплазмовим компресором із поздовжнім магнітним полем»*, подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» з галузі знань 10 – «Природничі науки».

Обґрунтування вибору теми дослідження

Дисертація Волкової Юлії Євгенівни на здобуття ступеня доктора філософії присвячена розв'язанню *актуальних* задач та торкається низки *важливих для науки питань*, таких як: отримання потужних потоків плазми, вдосконалення плазмодинамічної системи для отримання таких потоків, вивчення поведінки самостиснених плазмових потоків, що генеруються магнітоплазмовим компресором (МПК) із зовнішнім магнітним полем у розрядному каналі. У роботі досліджено вплив поздовжнього магнітного поля як на розрядні характеристики пристрою, так і на параметри плазмового потоку, що поширюється за розрядним каналом МПК. Проведене дослідження є цікавим як з точки зору фундаментальної фізики плазми, так і прикладних застосувань, зокрема для зміни властивостей поверхні металів і сплавів і покращення їхніх експлуатаційних характеристик.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертація складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел, який містить 122 найменування. Робота містить 57 рисунків та 2 таблиці. Загальний обсяг роботи складає 150 сторінок, з них основного тексту – 110 сторінок, що відповідає вимогам до дисертації на здобуття ступеня доктора філософії.

У вступі наведено обґрунтування вибору теми дослідження, визначено мету і завдання, об’єкт, предмет, методологію дослідження, розкрито наукову новизну і практичне значення отриманих результатів дисертації, зазначено особистий внесок здобувача при виконанні дисертаційного дослідження, наведено перелік наукових публікацій здобувача за темою дисертації та дані щодо апробації матеріалів дисертації, встановлено зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

У першому розділі коротко описується історія розвитку досліджень сильнострумових плазмових джерел різних типів. Наводяться основні як теоретичні, так і експериментальні результати вивчення руху плазми в каналах різної геометрії, взаємодії щільних потоків плазми із зовнішнім, по відношенню до плазми, магнітним полем.

Другий розділ присвячений опису експериментального стенду, в якому проводилися дослідження. Детально описана система для створення зовнішнього магнітного поля та методика розрахунку силових ліній магнітного поля.

У третьому розділі описані методи та засоби діагностики плазми. Основну увагу приділено застосовності зондової методики вимірювань магнітних та електричних полів та температури плазми в потоці. Детально описано методику отримання просторових розподілів струмів, що протікають за межами каналу джерела плазми. Детально

обґрунтовано застосовність подвійних електричних зондів для вимірювання температури електронів. Проведено «калібрувальні» експерименти та показано, що подвійний електричний зонд працює в дифузійному режимі.

У четвертому розділі описано методику та результати дослідження електротехнічних характеристик розряду в джерелі плазми. Детально проаналізовано вплив зовнішнього поздовжнього магнітного поля, що прикладається до каналу джерела плазми. Зокрема вивчено вплив магнітного поля на розподіл струмів, що протікають у потоці, що генерується. Проведено аналіз розподілу температури електронів та електричного поля в різних режимах роботи прискорювача. Виміряні розподіли власного магнітного поля та електричного поля використовувалися для вивчення просторових розподілів електромагнітних сил та швидкостей дрейфу в потоці. Виявлено формування нейтрального струмового шару та генерації в його об’ємі пучка плазми зі швидкістю, що більш ніж на порядок перевищує швидкість основного потоку.

У висновках чітко сформульовано основні положення, що виносяться на захист.

Найважливіші наукові результати, отримані дисертанткою

У дисертаційному дослідженні отримано низку нових та оригінальних результатів:

1. Уперше досліджено залежність вольт-амперних характеристик МПК від величини поздовжнього магнітного поля в розрядному каналі при роботі з різними газами за різних початкових тисків.
2. Вперше проведено дослідження впливу зовнішнього магнітного поля в каналі МПК на розподіл власного азимутального магнітного поля, електричного струму, швидкості дрейфу та сили Ампера в

плазмовому потоці за каналом. Показано, що істотно змінюється структура плазмового потоку, спостерігається менше вихорів струму, зона стиснення займає більший об’єм, а сила Ампера, під дією якої вона формується, зростає в 3-4 рази.

3. Проведено визначення просторового розподілу електронної температури в компресійному плазмовому потоці. Уперше показано, що за присутності поздовжнього магнітного поля в розрядному каналі МПК температура в зоні компресії зростає вшестеро, поблизу осі потоку з’являються дві популяції електронів з різними температурами, що є ознакою бімаксвелівської функції розподілу електронів.
4. Уперше встановлено, що в компресійному потоці плазми, який генерується МПК, відбувається формування струмової структури, за ознаками подібної до нейтрального струмового шару. Показано, що за присутності зовнішнього магнітного поля формування цієї структури відбувається раніше.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, одержаних Волковою Ю.Є. при проведенні досліджень за темою дисертаційної роботи, забезпечується використанням добре відомих методів діагностики плазми, обґрунтуванням їх застосовності, порівнянням отриманих результатів із результатами теоретичних досліджень. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в індексованих наукових журналах та доповідалися на міжнародних наукових конференціях.

Апробація дисертації та публікації

Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, International Conference on research

and applications of plasmas PLASMA-2019, Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу-2019, 15th Kudowa Summer School ”Towards Fusion Energy”, XV International Conference "Plasma Electronics and New Acceleration Methods", XVII International Scientific Conference Electronics and Applied Physics, 16th Kudowa Summer School “Towards Fusion Energy”, 48th European Physical Society Conference on Plasma Physics.

Результати дисертації належним чином представлено в *6 наукових статтях* у вітчизняних та закордонних фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.

Оформлення дисертації

Оформлення дисертації *повністю відповідає вимогам* «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44) та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. №40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

Практичне значення результатів дисертації

У роботі отримано ряд вагомих результатів, що свідчать про можливість застосування порівняно слабкого зовнішнього магнітного поля в таких розрядних системах для генерації плазмових потоків з більш високою температурою та високими параметрами компресії. Квазістаціонарні розрядні пристрої з такими параметрами, оснащені системами додаткового магнітного поля, широко використовуються для моделювання умов, що виникають на пластинах дивертора термоядерного реактора ІТЕР під час перехідних процесів. Результати дисертації можуть бути використані в дослідженнях, що проводяться в ННЦ “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України, Інституті

ядерних досліджень НАН України, Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна. Вони також можуть бути використаними в Інституті фізики плазми та лазерного мікросинтезу (Польща), ITER (Міжнародний Термоядерний Експериментальний Реактор, Франція).

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації

1. На багатьох графіках, як-от 4.4 – 4.7; 4.13 – 4.17 відсутні довірчі інтервали, хоча в тексті йдеться про загальну повторюваність розрядів.
2. У роботі наведено багато результатів дослідження електротехнічних характеристик розряду, в тому числі у різних газах. Разом з тим, із тексту дисертації не є зрозумілою мета використання такого набору різних газів.
3. В дисертаційній роботі стверджується, що вимірювана за допомогою подвійних електричних зондів величина електронної температури є заниженою. На жаль, авторка не навела жодних міркувань чи оцінок, на яку величину чи порядок величини температура може бути заниженою.
4. Наведено результати розрахунків просторових розподілів швидкості дрейфу частинок. Проте в тексті не зазначено, чи враховувався вплив зовнішнього магнітного поля у виконаних розрахунках. Крім цього не вказано точність розрахунку швидкостей, що є дуже важливим, оскільки проводилося диференціювання початкових експериментальних даних.
5. Не простежено часову динаміку нейтрального струмового шару.

Однак зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку результатів дисертаційної роботи та обґрунтованість наведених здобувачкою висновків.

Загальні висновки

Дисертація Волкової Юлії Євгенівни на тему «Динаміка плазмового потоку, що генерується магнітоплазмовим компресором із поздовжнім

магнітним полем» є завершеним науковим дослідженням, є актуальною, має наукову новизну та практичну значимість.

Тема та зміст дисертації повністю відповідають спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали», вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), та наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

Вважаю, що Волкова Юлія Євгенівна *заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії* з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач кафедри
фізичної електроніки
Київського національного
університету імені Тараса Шевченка *Анатолій ВЕКЛИЧ*

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 22:55:10 11.10.2023

Назва файлу з підписом: Відгук_Веклич.pdf.asice
Розмір файлу з підписом: 162.2 КБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: Відгук_Веклич.pdf
Розмір файлу без підпису: 166.4 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ВЕКЛИЧ АНАТОЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ
П.І.Б.: ВЕКЛИЧ АНАТОЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ
Країна: Україна
РНОКПП: 2177014878
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 22:55:08 11.10.2023
Сертифікат виданий: АЦСК АТ КБ «ПРИВАТБАНК»
Серійний номер: 248197DDFAB977E50400000007891201AF1C4C04
Алгоритм підпису: ДСТУ-4145
Тип підпису: Удосконалений
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)
Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)
Сертифікат: Кваліфікований