

## **ВІДЗИВ**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Андрієнко Ольги Володимирівни

на тему «**ДОВГОМІРНА ПЛАЗМОВА СИСТЕМА МАЛОГО ДІАМЕТРУ З**

**ТЛЮЧИМ РОЗРЯДОМ НИЗЬКОГО ТИСКУ**»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації

за спеціальністю 171 – Електроніка.

### **Актуальність теми дисертації.**

Робота присвячена в кінцевому рахунку розвитку йонних технологій обробки матеріалів в умовах довгомірних виробів малого діаметру для медицини, виробів оборонної промисловості, виробів тонкої механіки, тощо на основі моделювання жевріючих розрядів низького тиску як джерела йонів. Тому вона є актуальною.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

Вперше побудовано фізико-топологічну гідродинамічну модель довгомірної плазмової системи з жеврійним розрядом в дрейфово-дифузному наближенні з урахуванням широкого спектру елементарних процесів у плазмі, що дозволило адекватно розрахувати параметри розряду і розрядної плазми в довгомірних вузьких трубчастих електродних системах у середовищі аргону. Вперше побудована також модель газорозподілу у довгомірній плазмовій коаксіальній системі малого діаметру з перфорованим внутрішнім електродом у ламінарному режимі руху газових молекул, яка дозволяє визначити характеристики розподілу газу в газорозрядному проміжку.

Достовірність наукових результатів забезпечується постійним контролем точності виконуваних розрахунків та підтверджується проведеними експериментальними дослідженнями. Отримані результати є цілком обґрунтованими, оскільки вони базуються на використанні сукупності сучасних параметрів елементарних процесів.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.



**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Андрієнко Ольги Володимирівни повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 171 – Електроніка та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми 17 – Електроніка та телекомунікації.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Андрієнко Ольги Володимирівни є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Опонент порушення принципів академічної доброчесності не вбачає.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана загалом хорошою українською мовою. Загальне термінологічне зауваження: використання «тліючий» розряд замість «жеврійний», як його називав перший видатний український дослідник цього явища Іван Пулюй, прийнявши естафету майже безпосередньо у Майкла Фарадея. На жаль, на сьогодні – це все ще майже загальноукраїнське явище. Іноді в дисертації використовується також: явища «переносу» замість «перенесення».

Текст дисертації написаний послідовно за належної доступності викладення; дещо більшої уваги доцільно було приділити хіба що анотації та вступній частині.

Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 144 сторінок.

У вступі сформульовані найбільш загальні положення дисертаційної роботи щодо обґрунтування теми, актуальності роботи, мети, тощо. Проте найбільш виразною з точки зору опонента є констатація того, що «основні наукові положення і результати, що наведені в дисертації, отримані автором особисто».

У першому розділі представлена оглядова частина щодо застосувань тонких металевих трубок і, зокрема, з перфорацією та описані відомі плазмові системи для обробки внутрішньої поверхні тонких довгих трубок, для біомедичних застосувань та інші області застосування плазмових систем. Тут робиться спроба якось означити сукупність довгих тонких трубок, в яких досліджується жеврійний розряд на основі співвідношенням довжини до діаметра ( $L:d \gg 1$ ). Проте поки що таке означення не дуже вдале, бо під нього підпадуть і звичайні водопровідні труби. Зрештою, для досягнення кінцевої



мети виконання роботи це не так важливо. Більш істотно, що акуратно аналізуються фактори, які впливають на вибір типу розряду для плазмової обробки поверхонь трубок, а за тим – аналіз практично всіх видів відомих розрядів як потенційних агентів для такого очищення. Робиться обґрунтований базовий висновок щодо доцільності використання в дисертаційній роботі для генерації іонів плазмової системи на базі аномального жеврійного розряду, а для вибору умов його створення – фізико-топологічного моделювання у коаксіальній системі, де зовнішнім електродом є довга тонка трубка.

**Другий розділ** присвячений аналізу сучасного стану досліджень в області моделювання жеврійного розряду, зокрема, виконані огляд та класифікація методів його моделювання. На основі досліджень переваг та недоліків цих моделей, дисертантка зупинилася на виборі гідродинамічного підходу в дрейфово-дифузному наближенні для продовження аналітичної роботи. Це є обґрунтованим компромісом між точністю опису основних фізичних процесів у жеврійному розряді та ефективністю чисельних розрахунків, що робить його оптимальним для моделювання в коаксіальній системі. Для розрахунків використовується система рівнянь адаптована для циліндричної коаксіальної геометрії.

Певна увага в цьому розділі приділена відмінності моделювання коаксіальної системи від плоских дисків. Відмічається, що коаксіальні системи забезпечують кращу енергетичну ефективність, оскільки втрати енергії на зіткнення іонів із стінками зменшуються через специфічну геометрію електродів (с. 60). Це дозволяє використовувати такі системи в умовах низьких значень  $pd$ , що є критично важливим для багатьох плазмових технологій. У системах із плоскими дисками енергетична ефективність залежить від рівномірності розподілу поля, однак втрати можуть бути більшими через більшу площу взаємодії заряджених частинок із стінками.

Моделювання коаксіальних систем є суттєво складнішим у порівнянні з системами із плоскими електродами через їхню специфічну геометрію, нерівномірність електричного поля і радіально залежний розподіл плазмових параметрів. Ці особливості роблять коаксіальні системи більш ефективними для спеціалізованих задач, таких як обробка внутрішніх поверхонь металевих деталей або створення вузькоспеціалізованих іонно-плазмових технологій. Водночас їх математичне моделювання вимагає складніших підходів, що враховують всі просторово-залежні характеристики.

Робота виграла б, якби було виконане порівняння також з жеврійним розрядом у сферичній геометрії, де радіальний розподіл параметрів плазми є ще більш істотним. Ці дослідження є доволі рідкісними, але не для України – вони виконані в науковому колективі опонента і опубліковані в українських наукових журналах (див., наприклад, таку роботу з її посиланнями: В.А.



Жовтянський, О.В. Анісімова. Роль прианодних процесів в енергетиці жеврійного розряду // Укр. фіз. журн. – 2016. – Т. 61, № 2. – С. 104 – 112. <https://doi.org/10.15407/ujpe61.02.0098>).

До цього розділу є одне зауваження щодо, ймовірно, описки в одному із випадків: на с. 58 вказано, що «катод розташований концентрично всередині анода», а на с. 61: «від катода (поверхні трубки) до анода (осьового електроду)».

**Розділ третій** є основною науковою частиною дисертаційної роботи, в якому отримана переважна сукупність кінцевих її результатів. У ньому виконане власне моделювання жеврійного розряду з використанням пакету Comsol Multiphysics. У ньому адекватно представлена як складна просторова структура самого розряду, так і сукупність елементарних процесів, які є визначальними для аналітичних досліджень. При цьому уважно аналізуються переваги й недоліки вибраного гідродинамічного підходу в дрейфово-дифузному наближенні. Він є компромісом між точністю опису основних фізичних процесів у розряді та ефективністю чисельних розрахунків, що робить його оптимальним для моделювання в коаксіальній системі. Для розрахунків використовується система рівнянь, адаптована для циліндричної коаксіальної геометрії. Моделювання здійснюється на основі фізико-топологічної моделі жеврійного розряду за умови значення параметру  $pd \approx 1$  Па·м, що відповідає лівій частині мінімуму кривої Пашена.

Як і слід було очікувати, в результаті моделювання отримані сукупності просторових розподілів параметрів плазми в досліджуваному розряді низького тиску. Лише тут стає зрозумілим, що моделювання передбачалось для двох варіантів розряду в коаксіальній системі: з внутрішнім анодом і з внутрішнім нитковим катодом. Виокремлюється така обставина якісного характеру, що розряд вважається ускладненим, якщо протяжність катодного падіння більша або дорівнює міжелектродній відстані.

Для розряду з внутрішнім анодом не зовсім зрозумілою є різниця параметрів щодо довжини електродів у табл. 3.5 (280 мм) і на рис. 3.10 (28 мм). Проте у всьому іншому виконаний глибокий аналіз процесів в обох варіантах моделей. Зокрема, фізично дуже обґрунтовано введена так звана модифікована ВАХ, яка дозволяє порівнювати результати в тих чи інших системах без неоднозначного впливу торцевих частин електродної системи. При цьому недостатньо прозоро характеризується різниця між ВАХ для аноду та катода при різних тисках. Проте фізично коректно виокремлена роль геометрії жеврійного розряду на основі порівняння кривих 1 і 2 на рис. 3.8 (див. також с. 81).

Для розряду з внутрішнім нитковим катодом привертає увагу аналіз стабільності системи розряду з точки зору частотних та фазових співвідношень.



Зазвичай такого роду проблеми є «незручними» для дослідників і їх стараються просто уникати. Це робить честь дисертантці як автору приведених на сс. 90 – 91 результатів.

Найбільш специфічною з точки зору можливості порівняння з відомими результатами досліджень жеврійних розрядів є двохелектродна система в діелектричній оболонці, як елементарна комірка для світо-/плазмогенеруючого модуля (див. підрозд. 3.6). Авторка успішно розібралась з такою системою, а отримані результати слугували для створення індикатора критичної напруженості електромагнітного поля.

Розділ завершується моделюванням високовольтного іонного діоду в коаксіальній системі електродів в азотній атмосфері. Ця частина роботи описана доволі скупо, хоча фізично коректно наголошено про те, що спеціальний «аналіз струмових даних підтверджує, що саме іонна провідність забезпечує проходження електричного струму в розглянутому розряді і служить фізичним поясненням назви досліджуваної електродної структури як йонний діод» (с. 102).

Скупість теоретичних викладок компенсується експериментальною валідацією розрахункових даних: був проведений експеримент з коаксіальним йонним діодом, який входить у склад озонатору з дрововим катодом з вольфраму. Представлені кінцеві результати роботи самого озонатора.

До стилістичних зауважень цього розділу відноситься постійне використання авторкою словосполучення «рівняння вирішувалось» замість «рівняння розв'язувалось» (див., наприклад, с. 100).

**Розділом 4** авторка завершує змістовну частину дисертації. В цій, відносно невеликій частині дисертації, описані дослідження жеврійного розряду в довгих коаксіальних порожнинах з перфорованим електродом. Вони поєднують як експериментальне дослідження умов створення стабільного і однорідного плазмового розряду в довгих трубках малого діаметру, так і моделювання протікання газу через перфоровану трубку в коаксіальній розрядній системі. Ця частина роботи дозволила визначитись з найбільш прикладною частиною цілісної задачі, сформульованої темою дисертації. Показано, що запропонована модель є адекватною для розрахунків параметрів розряду як в суцільних, так і в перфорованих трубках за умови стаціонарного тиску в газорозрядній системі, коли немає продування газу через трубку. За умови продування газу через трубку задача ускладнюється тим, що потік перестає бути ламінарним. Проте окремо для неламінарних потоків можна визначити характеристики розподілу газу в електродній системі заданої геометрії, зокрема, величину неоднорідності газового потоку.



Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 10 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 0 статей у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 0 статей у виданнях, віднесених до першого — третього кварталів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports; 0 патентів на винахід, що пройшли кваліфікаційну експертизу та безпосередньо стосується наукових результатів дисертації; 0 патентів України на корисну модель; 0 одноосібних монографій, що рекомендовані до друку Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського та пройшли рецензування.

Також результати дисертації були апробовані на 5 наукових фахових конференціях.

З точки зору опонента публікації здобувача виконані на хорошому науковому рівні, а дотримання в наукових публікаціях принципів академічної доброчесності не викликає сумнівів.

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи вказані вище по тексту при розгляді кожного окремо розділу. Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

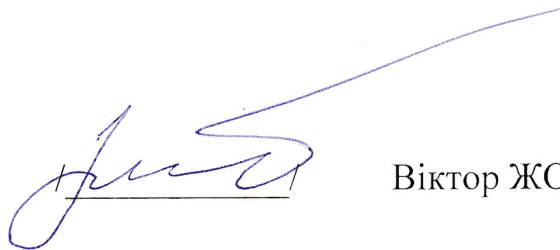
Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Андрієнко Ольги Володимирівни на тему «Довгомірна плазмова система малого діаметру з тліючим розрядом низького тиску» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової

спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Андрієнко Ольга Володимирівна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 171 – Електроніка.

**Офіційний опонент:**

Завідувач відділу  
плазмових процесів і  
технологій Інституту газу  
НАН України, чл.-кор. НАН  
України, д-р фіз.-мат наук,  
професор



Віктор ЖОВТЯНСЬКИЙ



МП.

«27» червня 2025 року