

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Спіріна Єгора Володимировича

«Розроблення та дослідження реактивних двигунів на металевій плазмі
з керованою вакуумною дугою»

представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
зі спеціальності 134 – Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Актуальність теми дисертації.

Сучасний етап розвитку світової ракетно-космічної техніки характеризується стрімким збільшенням кількості орбітальних місій, інтенсифікацією використання навколоземного простору та висуненням принципово нових вимог до рушійних установок космічних апаратів. Традиційні хімічні ракетні двигуни, попри їхню високу питому потужність, яка є безальтернативною для виведення корисного навантаження із Землі на навколоземну орбіту, мають суттєві обмеження в умовах довготривалих космічних польотів через критичну лімітованість бортового запасу хімічного палива. У зв'язку з цим науково-технологічний пошук змістився у бік розроблення та впровадження електричних рушійних установок (ЕРУ). Головною перевагою ЕРУ є можливість відновлення енергетичного балансу безпосередньо в космічному просторі за рахунок фотоелектричних сонячних елементів, що робить ресурс автономності таких двигунів потенційно невичерпним за наявності джерела випромінювання.

Серед різноманіття ЕРУ значну увагу дослідників і конструкторів привертають плазмові ракетні двигуни, зокрема вакуумно-дугові реактивні двигуни на металевій плазмі. Вони розглядаються як ефективний інструмент для вирішення широкого спектра прикладних завдань від точного позиціонування, стабілізації та корекції орбіт нано- й мікросупутників до транспортування космічного сміття. Фізичний принцип функціонування плазмових ракетних двигунів базується на процесах, що протікають у

катодних плямах вакуумно-дугового розряду, де відбувається високоенергетичне перетворення твердофазного металу катода в прискорені та високоіонізовані потоки металевої плазми. Важливою конструкційною перевагою плазмових ракетних двигунів є відсутність потреби у складних і масивних допоміжних системах, а саме: газовому чи рідкому паливі, нейтралізаторах об'ємного заряду, газових нагрівачах, високоприскорювальній електроніці або навмисно згенерованих сильних зовнішніх магнітних полях, що мінімізує загальну масу та габарити рушійної системи.

Донедавна світовий досвід проектування плазмових ракетних двигунів був зосереджений переважно на імпульсних системах мікропотужності з тривалістю розряду від кількох мікросекунд до мілісекунд, що зумовлювалося обмеженнями ємнісних та індуктивних бортових джерел живлення. Такі системи забезпечували мікроньютонівий діапазон тяги при масі робочого тіла до кількох десятків грамів, що обмежувало їх застосування винятково класом наносупутників. Сучасний прогрес у розвитку високоефективної космічної енергетики віродив науковий інтерес до потужніших квазістаціонарних рушійних систем секундної тривалості або постійного струму, здатних генерувати тягу на рівні десятків міліньютонів, що дозволяє масштабувати їх використання на ширший клас космічних апаратів. Для досягнення таких показників сучасні розробки передбачають інтеграцію кількох синхронізованих блоків із масивними циліндричними або прямокутними катодами в єдину рушійну систему.

Водночас перехід до довготривалих режимів роботи та збільшення геометричних розмірів робочих тіл випаровувачів оголили фундаментальну технічну суперечність. Оскільки природне переміщення катодних плям вакуумної дуги за відсутності керуючих факторів має виражений стохастичний (хаотичний) характер, просторово-часовий розподіл ерозії робочої поверхні масивного катода стає критично нерівномірним. Це призводить до локального передчасного прогорання матеріалу, деградації

геометрії міжелектродного проміжку, зривів стабільного горіння розряду і, як наслідок, до катастрофічного зниження загального експлуатаційного ресурсу двигуна. Збільшення площі робочої поверхні катода лише загострює цю проблему, унеможливаючи використання таких установок у тривалих автономних космічних місіях, де тривалість безвідмовної роботи є головним критерієм ефективності.

Таким чином, існує об'єктивна потреба в усуненні зазначеного недоліку шляхом розроблення нових фізико-технічних підходів до керування динамікою катодних плям та оптимізації геометрії розрядної системи з метою забезпечення рівномірної виробітки робочого тіла.

Зважаючи на вищевикладене, актуальною науково-практичною задачею, що має важливе значення для розвитку матеріалознавства для космосу та ракетного двигунобудування, є обґрунтування, розробка та дослідження вакуумно-дугових ракетних двигунів на металевій плазмі з підвищеним експлуатаційним ресурсом роботи шляхом забезпечення контрольованої рівномірної ерозії паливного компонента.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків.

Достовірність і обґрунтованість науко-технічних положень основана на комплексному і цілісному характері як при плануванні та розробці методики проведення досліджень, так і при організації експериментальних робіт з аналізом і при інтерпретації отриманих даних.

На основі критичного аналізу сучасного світового рівня розробки реактивних двигунів на металевій плазмі було науково обґрунтовано й реалізовано комплекс принципів шляхів підвищення їхніх технічних характеристик. Достовірність підходів забезпечено одночасним урахуванням та інтеграцією чинників тривалості дугового розряду, впровадженням нових типів джерел живлення, оптимізацією магнітного поля та застосуванням безвідмовних систем ініціювання розряду.

Надійність практичної реалізації підтверджується розробкою оригінальних концептуальних схем та повного комплексу конструкторської документації, за якими було безпосередньо виготовлено діючі експериментальні зразки вакуумно-дугових плазмових двигунів, спеціалізовані системи їхнього електроживлення та унікальний стендовий вимірювальний комплекс.

Стабільність і відтворюваність умов експерименту гарантується розробкою та впровадженням алгоритмів програмування цифрової системи автоматизованого керування переміщенням катодних плям вакуумної дуги, що дозволило мінімізувати стохастичний фактор і забезпечити рівномірність ерозії паливного компонента.

Експериментально досліджено вихідні характеристики макетів двигунів, зокрема, величину реактивної тяги за широкого спектра варіювання параметрів енергоживлення, напруженості та конфігурації магнітного поля, а також при різних геометричних модифікаціях анодних та катодних вузлів. Стабільна збіжність повторних вимірювань підтверджує фізичну коректність отриманих результатів.

У роботі вперше встановлено кількісні закономірності впливу параметрів вакуумно-дугового розряду, а саме: величина розрядного струму, часові характеристики імпульсу та параметри зовнішніх магнітних полів на кінетичні характеристики плазмового струменя та сумарну реактивну тягу установки.

Сформульовані науково обґрунтовані інженерні рекомендації щодо проектування високоресурсних плазмових рушійних систем, що пройшли апробацію та повністю готові до впровадження на підприємствах ракетно-космічної галузі, що додатково засвідчує достовірність і практичну значущість виконаної роботи.

Основні результати і новизна дисертації.

Дисертаційна робота Спіріна Є.В. містить новітні науково-технічні розробки з проектування вакуумно-дугових плазмових двигунів де

реалізовано примусове керування рухом катодних плям, що забезпечує рівномірну ерозію матеріалу катода та суттєво підвищує експлуатаційний ресурс установки.

Вперше експериментально досліджено вихідні характеристики та параметри вакуумно-дугових двигунів за тривалості розряду секундного діапазону.

Розроблено та всебічно досліджено конструкцію двигуна з дисковою геометрією катода, де примусове сканування катодних плям здійснюється комбінованим магнітним полем соленоїда та постійного магніту.

Створено й протестовано рушійну систему зі спіральним катодом, де стабільне переміщення катодних плям забезпечується власним магнітним полем розряду. Технічні рішення захищено заявкою на винахід (реєстраційний № П27-1 від 20.04.2026 р., ДП «КБ «Південне»).

Одержано кількісні залежності величини реактивної тяги двигуна від ключових електрофізичних параметрів вакуумно-дугового розряду.

Найбільш важливі практичні результати дисертаційної роботи:

Сформульовано комплексні інженерні рекомендації щодо проектування високоресурсних вакуумно-плазмових двигунів та оптимізації супутніх систем їхнього електроживлення.

Створено, виготовлено та експериментально верифіковано дві базові модифікації плазмових двигунів із дисковою та спіральною геометрією катодних вузлів.

Експериментально обґрунтовано закономірності динаміки катодних плям та доведено ефективність їхнього просторового позиціонування за допомогою змінного магнітного поля арочної конфігурації.

Зауваження до тексту і змісту дисертації.

1. Сторінка 8, 1. Вперше запропоновано та науково обґрунтовано принцип організації робочого процесу у вакуумно-дугових двигунах шляхом

програмованого примусового переміщення катодних плям по складних спіральних траєкторіях на дискових та спіральних катодах, що, на відміну від традиційних схем, забезпечує керовану інтегральну ерозію всієї поверхні катода та підвищення його експлуатаційного ресурсу.»

Необхідно відмітити, що в вакуумно-дугових випаровувачах для досягнення рівномірної ерозії катода давно використовується примусове переміщення катодних плям за допомогою магнітного поля. Але в реактивних двигунах на металевій плазмі цей принцип дійсно використаний вперше.

2. Ви актуально розписали першу главу. Назвіть будь ласка які матеріали для випаровувачів найбільш доцільно використовувати і чому? За яким принципом відібрано наприклад такі матеріали: Al, Cu, Ti, W?

3. Глава 2.2 Ви описуєте використання постійної і імпульсної напруги, але в роботі не описано імпульсну технологію розпилення матеріалів вакуумно-дугових плазмових двигунів.

4. В методиці описано електронні ваги. Чи є електромагнітний вплив (наводки) на роботу приладу всередині вакуумно-дугової установки?

5. В розділі 3 описано дослідження впливу силових ліній магнітних полів на роботу дискових катодів, але в методиці не наведено обладнання, що використано для реєстрації цих магнітних ліній.

6. На рисунку 3.10 наведено постійні магніти та 2 соленоїди. Обґрунтуйте будь ласка навіщо так ускладнено магнітну систему для утримання дуги?

7. Чому не враховано в розрахунку реактивної тяги, те що матеріал вакуумно-дугового двигуна випаровується. Отже після кожного експерименту є зменшення маси матеріалу випаровувача. А у вас написано, що... «а ваги з тим же запізненням зменшуються до вихідного значення». Прокоментуйте це.

8. Таблиця 3.2. Перші два та останні три стовбця наведено струм 3,6 -3,8 А. Що це за струм?

9. Таблиця 3.2. Струм розряду фіксується до четвертого знаку після коми. Чим це вимірювалось? Чи несе смислове навантаження така точність вимірів?

10. При використанні спіральних двигунів чи застосовувалось водяне охолодження?

11. На фотографіях двигунів наведено виступаючу центральну частину. Які функції виконує ця центральна частина?

12. ст.105 «Результати досліджень показують, **що величина питомої реактивної тяги вакуумно-дугових плазмових двигунів зі спіральним катодом значно вища, ніж питома реактивна тяга двигунів з дисковим катодом, в яких використовується арочне магнітне поле для керування переміщенням катодних плям по поверхні катоду.**» Поясніть більш детально цей висновок.

13. Рисунок 4.17. Що треба зробити щоб центральна частина не перегрівалась? Бо це може впливати на чистоту експериментів.

14. ст.113 пункт 6. Вартість виготовлення це не головне при використанні вузлів у космосі.

15. Чи залежить реактивна тяга від струму дуги та матеріалу катоду?

16. Чи були у вас дослідження витривалості роботи випарників? Скільки годин може відпрацювати спіральний та дисковий катод?

У той же час наведені зауваження не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи Спіріна Є.В. в цілому. Представлена дисертаційна робота виконана на високому рівні і є завершеним науковим дослідженням, має наукову і практичну новизну. Достовірність одержаних результатів та особистий внесок автора в роботі не викликають сумнівів.

Висновок.

Дисертаційна робота Спіріна Єгора Володимировича «Розроблення та дослідження реактивних двигунів на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою» має високий науково-технічний рівень та практичне значення, вона повністю відповідає вимогам пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» (Постанова КМУ від 24 липня 2013 року №567), а також вимогам МОН України до дисертацій на здобуття наукового

ступеня доктора наук, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 - Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Офіційний опонент

Старший науковий співробітник

Президії Національної академії

наук України

д.т.н., ст.досл.



В'ячеслав СТОЛБОВИЙ

