

7. ПРОЦЕСИ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 629.7

Баранов О.О., д.т.н., професор

o.baranov@khai.edu

Бреус А.О., к.т.н., доцент

a.breus@khai.edu

Сердюк О.Л., аспірант

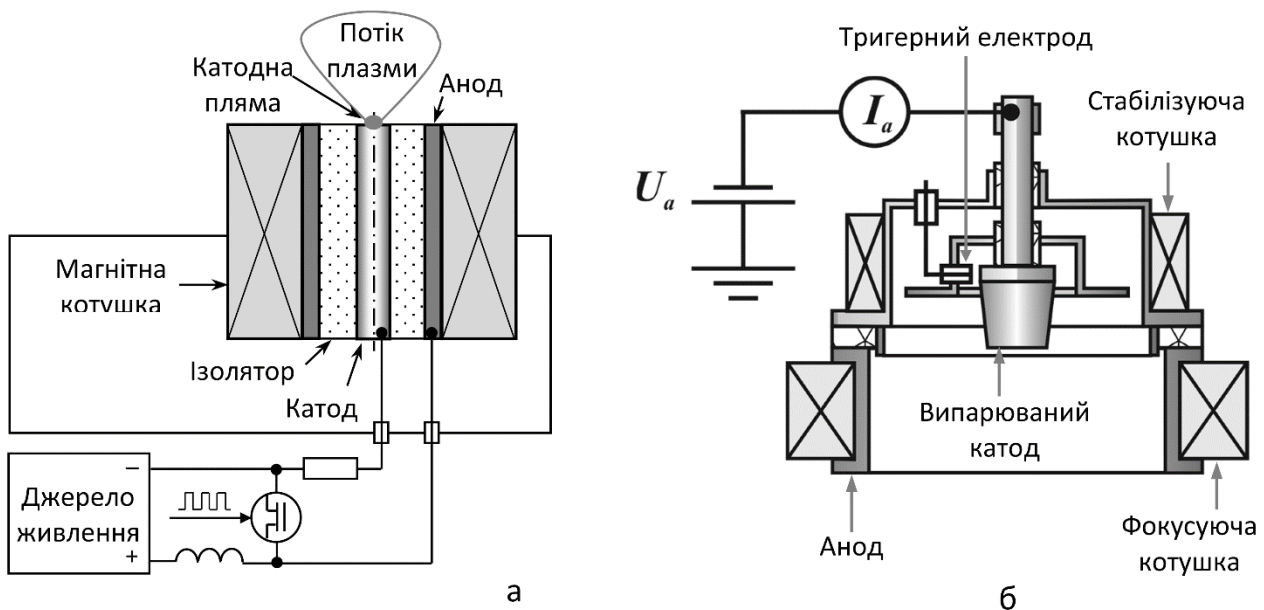
alserdyuk@fed.com.ua

ПРОБЛЕМИ РОЗРОБКИ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ДВИГУНІВ

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут», Україна

Дуговий розряд активно використовується вже понад півстоліття завдяки своїм унікальним властивостям. Генерація плазми відбувається в процесі вибуху, коли протягом дуже короткого часу виникає надщільна повністю іонізована плазма ($\sim 10^{19}-10^{20} \text{ cm}^{-3}$), збагачена іонами, кластерами твердої фази та краплями матеріалу катода [1, 2]. На цей час запропоновано велику кількість технічних рішень для управління процесом генерації дуги, електродної ерозії, руху катодних плям, плазмового розширення, які дозволяють розробити цілий клас пристроїв, таких як сорбційні насоси, технологічні установки вакуумно-дугового осадження, а також дугові двигуни [3]. Схеми двох пристроїв, де використовується катодна пляма для генерації плазми, наведено на рисунку 1.



а – схема вакуумно-дугового двигуна з магнітним підсиленням; б – схема вакуумно-дугового джерела плазми

Рисунок 1 – Використання катодної плями для генерації плазми.

Одним з перспективних типів двигунів для виконання в системах орієнтації космічного приладу (attitude control) є вакуумно-дуговий двигун, який відноситься до плазмових двигунів надмалої тяги та може розвивати тягу близько 1 мкН та характеризується високим питомим імпульсом (1000–3000 с). Додатковою перевагою є те, що для дугових двигунів струм електронів від дуги перевищує струм іонів, таким чином космічний корабель заряджається позитивно по відношенню до локального потенціалу плазми, що дозволяє залучати

електрони з плазми, яка оточує корабель. Це усуває потребу в пристроях для нейтралізації вихлопу, на відміну від двигунів Холла, які використовують зовнішній катод для виробництва електронів, необхідних для нейтралізації іонізованого вихлопу, коли він викидається з каналу прискорення.

Багато видатних дослідників досліджували як експериментально, так і теоретично цікаві явища, пов'язані з дуговим розрядом, що є основою для подальшого розвитку техніки та технології вакуумної дуги в дослідженні космосу. Для космічного двигуна дуговий розряд дає ряд переваг, таких як можливість використання компактного твердого палива замість газових баків, високий ступінь іонізації плазми та велика різноманітність частинок плазми, що забезпечується специфічною плазмохімією. При цьому застосування ідей, розроблених для технологічної плазми, далеке від повного використання. Магнітне поле є одним із найпотужніших інструментів керування режимами роботи дугових плазмових пристроїв, однак їх застосування обмежене критичним збільшенням маси конструкції або впливом на роботу бортових приладів [4]; системи подачі матеріалу катода в зону розряду досить складні; проблеми ерозії конструкції, іскрового запалювання, а також вся проблема розробки дугового двигуна, придатного для зміни орбіти CubeSats – ось короткий перелік завдань, які необхідно вирішити для успішного впровадження дугової технології в космічні двигуни [5].

На сьогоднішній час запропоновано кілька схем дугових двигунів, але при цьому питання створення ефективного пристрою, який реалізує концепцію створення тяги шляхом випаровування матеріалу з твердої фази шляхом ініціації катодної плями, все ще далека від вирішення. На шляху постає ряд проблем, де має бути знайдені певні технічні рішення, що дозволять значно підвищити ефективність цього класу двигунів.

Першою проблемою є схема генерації катодної плями. В даний час використовуються три методи запуску дугового розряду: активація незалежним електричним джерелом, активація опором і тригерна активація. При цьому для самостійного запуску потрібен додатковий імпульсний генератор, а для резистивного запуску потрібен лише резистор, що з'єднує тригерний електрод. Але при використанні методу активації опором відносно низька напруга катод-анод призводить до значно меншого значення осьової складової електричного поля в області розширення плазми порівняно з активацією незалежного джерела, також спостерігався більш повільний перехід електронів від радіального руху до осьового. Для плазмового осадження електропровідних плівок був розроблений «безпусковий» метод ініціювання вакуумної дуги, у якому повинен існувати провідний шлях (покриття) між анодом і катодом перед запалюванням дуги, тому, коли напруга прикладається між електродами, покриття резистивно нагрівається струмом, що призводить до швидкого утворення плазми. Для ряду катодних матеріалів було виявлено, що безпусковий метод є дуже надійним, але необхідний баланс між осадженням і ерозією провідного матеріалу. Це означає, що необхідний зворотний потік матеріалу, що випаровується з катода, і цей потік може впливати на роботу електронних пристроїв супутника.

Другою проблемою є оптимізація хімічного та морфологічного складу матеріалу, що має бути випарований для утворення тяги. Певні дослідження показали низку закономірностей, які впливають на процес, а саме: матеріал катода з більшою когезійною енергією буде виробляти менше іонів для даного розрядного струму, і, таким чином, та сама енергія виробляє більше плазми для матеріалів з меншою когезійною енергією; зарядові стани компонента з низькою когезійною енергією покращуються порівняно з ситуацією з чистим металом, а іонні зарядові стани матеріалу з вищою когезійною енергією відносно знижені; таким чином, легування можна використовувати для контролю зарядових станів іонів певного матеріалу; імпульсні дуги мають вищі зарядові стани порівняно з дугами постійного струму; функція розподілу швидкості іонів для кожного матеріалу демонструє лише один пік і різні зарядові стани іонів матеріалу рухаються приблизно з однаковою швидкістю або кінетичною енергією – таким чином, гідродинамічне прискорення переважає над електростатичним прискоренням, що призведе до кінетичних енергій, пропорційних зарядовим станам; пікові швидкості іонів у плазмі, створеній складним катодом, однакові для

елементів і зарядових станів і не залежать від маси іонів, що можна пояснити газодинамічним механізмом прискорення іонів; відмінності у швидкості іонів між плазмою з різних складених катодів узгоджуються з правилом когезійної енергії; на осі розрядної системи домінують важкі атоми, а на краях – легкі; якщо елементи мають однакову масу, то кутові розподіли майже однакові; швидкості іонів різних матеріалів різні, причому швидкість легких іонів вище, ніж у випадку чистого катода.

Третьою проблемою є вплив місця запалювання та геометрії анода. Тут встановлені наступні залежності, які також не дозволяють поки що обрати найбільш раціональну схему: коли магнітне поле не використовується, центральний запуск дугового розряду покращує спрямованість завдяки ефективним профілям ерозії; вимірювання інтегрованого катодного струму показує, що циліндрична схема і пластинчаста схема більш ефективні у використанні матеріалу катода, ніж анод у формі дзвону; анод з найменшим тілесним кутом апертури забезпечує найбільший імпульс у перерахунку на іон; оптимальною може розглядатися циліндрична геометрія, але слід враховувати питання генерації катодної плями на боковій стороні.

Четвертою проблемою є власне теоретичний опис процесів генерації катодних плям. Найбільш розвинені моделі дозволяють дійти наступних висновків: однією з умов механізму самоузгодженого механізму катодної плями є течія невеликої плазми в прикатодній області; швидкість плазми на зовнішній межі шару Кнудсена визначає втрату маси катода; падіння потенціалу на катоді визначається роботою виходу, енергією електронів, швидкістю ерозії катода, втратою тепла на катоді та енергією, що переноситься до катода повернутими електронами; для більш тугоплавких катодних матеріалів падіння катодного потенціалу більше; рух плями зумовлений вичерпанням матеріалу під плямою; коли виступ випаровується, втрати тепла в об'ємі збільшуються і напруга досягає високих значень; коли стара пляма розпадається, на найближчому сусідньому виступі з'являється нова пляма з меншою напругою; коли струм дуги перевищує критичне значення, яке залежить від матеріалу катода, одночасно спрацьовують кілька плям; швидкість плями залежить від температури катода, морфології (плівка або об'єм) і шорсткості, а також від стану плазми або фонового газу в розрядному проміжку.

П'ятою проблемою є рух плями в магнітному полі, і взагалі, поведінка плазми у магнітних полях різної конфігурації. Два важливі явища вакуумної дуги спостерігаються, коли дуга працює в поперечному магнітному полі, а саме: групування катодної плями і ретроградний рух катодної плями, тобто рух в антиамперському напрямку.

Таким чином, незважаючи на відносну простоту існуючих конфігурацій вакуумно-дугових двигунів, концепція ефективного пристрою ще має бути розроблена.

Список використаних джерел

1. Particle-in-cell simulation of the cathodic arc thruster [Text] / K. F. Luskow, P. R. C. Neumann, G. Bandelow, J. Duras, D. Kahnfeld, S. Kemnitz, P. Matthias, K. Matyash, and R. Schneider // *Physics of Plasmas*. – 2018. – No. 25, paper no. 013508.
2. Beilis, I. I. Physics of Cathode Phenomena in a Vacuum Arc With Respect to a Plasma Thruster Application [Text] / I. I. Beilis // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2015. – No. 43. – P. 165–172.
3. Discharge ignition in the micro-cathode arc thruster [Text] / G. Teel, A. Shashurin, X. Fang, M. Keidar // *Journal of Applied Physics*. – 2017. – No. 121, paper no. 023303.
4. The influence of anode position and structure on cusped field thruster [Text] / X. Niu, H. Liu, C. Yang, W. Jiang, D. Yu, Z. Ning // *Physics of Plasmas*. – 2018. – No. 25, paper no. 040701.
5. Plasma under control: Advanced solutions and perspectives for plasma flux management in material treatment and nanosynthesis [Text] / O. Baranov, K. Bazaka, H. Kersten, M. Keidar, U. Svelbar, S. Xu, I. Levchenko // *Applied Physics Reviews*. – 2017. – No. 4, paper no. 041302.