

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА НА МЕТАЛЕВІЙ ПЛАЗМІ

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля,
вул. Криворізька, 3, 49008, Дніпро, Україна; e-mail:spiegodn@gmail.com

Вакуумно-дугові реактивні двигуни на металевій плазмі привертають до себе підвищену увагу через простоту їхньої конструкції, легку масштабованість і стійку, надійну роботу.

Метою статті є розробка електричного вакуумно-дугового двигуна на металевій плазмі з високим ресурсом роботи, а також дослідження його характеристик.

Методи дослідження: бібліографічний аналіз науково-технічної літератури, гравіметричний метод вимірювання тяги, вимірювання електричних характеристик.

У статті наведено результати розробки та дослідження вакуумно-дугового реактивного двигуна на металевій плазмі з дисковим катодом з алюмінієвого сплаву 5056 (аналог сплаву АМГ6). Реактивний двигун на металевій плазмі – це новий клас електричних рушійних установок, у яких метал переводиться в плазмовий стан за допомогою електричного розряду, і прискорений потік металевої плазми створює реактивну тягу. Порівняно з відомими конструкціями вакуумно-дугових реактивних двигунів на металевій плазмі розроблений двигун має значну масу катода (805 г) при площі його робочої поверхні 298 см². Двигун має спеціальну магнітну систему для керування переміщенням катодних плям розряду по робочій поверхні катода. Досліджено характер переміщення катодних плям при зміні величини та конфігурації магнітного поля, визначено величину реактивної тяги двигуна при різних величинах розрядного струму. Проведено порівняння величини реактивної тяги розробленого двигуна з величиною тяги відомих конструкцій вакуумно-дугових реактивних двигунів на металевій плазмі.

Наукова новизна результатів, отриманих автором, полягає в тому, що вперше в конструкції електричних вакуумно-дугових реактивних двигунів використано примусове переміщення катодних плям по поверхні катода для забезпечення рівномірної ерозії матеріалу катода та підвищення ресурсу роботи двигуна. Також вперше розроблена та досліджена конструкція електричного реактивного двигуна на металевій плазмі з дисковим катодом та управлінням переміщенням катодних плям дугового розряду за рахунок магнітного поля соленоїда та постійного магніту.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці рекомендацій щодо інженерного створення електричних реактивних двигунів на металевій плазмі та в результатах дослідження параметрів електричного реактивного двигуна з дисковим катодом.

Статтю призначено для фахівців у галузі ракетного двигунобудування.

Ключові слова: ракетно-космічна техніка, електричний реактивний двигун, вакуумно-дуговий розряд, магнітне поле, плазма.

Metal plasma vacuum-arc thrusters attract increased attention due to their design simplicity, easy scalability, and stable, reliable operation.

The goal of this work is to develop and characterize an electric metal plasma vacuum-arc thruster with a long service life.

Research methods: a bibliographic analysis of the scientific and technical literature, a gravimetric thrust measurement method, and measurement of electrical characteristics.

The article presents the results of development and characterization of a metal plasma vacuum-arc thruster with a disk cathode made of aluminum alloy 5056 (analog of AMG6 alloy). The metal plasma thruster is a new class of electric propulsion systems in which the cathode metal is converted into plasma using an electric discharge, and the accelerated flow of the metal plasma produces jet thrust. Compared with known designs of metal plasma vacuum-arc thrusters, the thruster developed has a significant cathode mass (805 g) with a working surface area of 298 cm². The thruster has a special magnetic system to control cathode spot motion over the working surface of the cathode. Cathode spot motion was studied at different magnetic field magnitudes and configurations, and the thrust was determined at different values of the discharge current and compared with that of existing metal plasma vacuum-arc thrusters.

The scientific novelty of the work lies in that the electric vacuum-arc thruster developed is the first to use the controlled motion of cathode spots in order to ensure uniform erosion of the cathode material and extend the service life. A disk cathode and cathode spot motion control by the magnetic field of a solenoid and a permanent magnet are a novelty too.

The practical value of the work lies in recommendations on the engineering design of electric metal plasma thrusters and in the results of characterization of an electric thruster with a disk cathode.

The article is intended for experts in rocket propulsion engineering.

Keywords: rocket and space technology, electric thruster, vacuum-arc discharge, magnetic field, plasma.

Вступ. Значну увагу конструкторів електричних реактивних двигунів привертають плазмові двигуни, зокрема двигуни на металевій плазмі [1–3]. Ефективним методом перетворення металу в потоки плазми та їх прискорення є використання електричних розрядів, зокрема вакуумно-дугового розряду. Вакуумно-дуговий двигун на металевій плазмі (Vacuum Arc Thruster, VAT) – це новий клас електричних рушійних установок, в яких іонізація металу та прискорення іонів здійснюється в області катодних плям вакуумного дугового розряду за рахунок процесів, які протікають в самому розряді [4, 5]. Такі двигуни можуть працювати без спеціальних систем іонізації та прискорення іонів. Для роботи вакуумно-дугового двигуна не потрібне газове або рідке паливо, нейтралізатори, нагрівачі, високовольтна електроніка, сильні електричні або магнітні поля.

Дуговий розряд викликає ерозію поверхні катода, внаслідок чого утворюються іони, а також дрібні крапельки, що мають назву макрочасток. Іони, що створюються в області катодних плям, мають високу енергію. Величина швидкості іонів різна для різних матеріалів катода і складає близько 10^4 м/с. Емітована з катодних плям плазма має дуже високу густину, що досягає 10^{26} м⁻³ у безпосередній близькості від катодної плями і близько 10^{20} м⁻³ на відстані в декілька міліметрів від нього [6].

Технологія вакуумно-дугових розрядів сьогодні використовується для промислового застосування, наприклад, імплантації іонів у поверхню виробів, плазмо-хімічного осадження тонких плівок нітридів, карбідів та оксидів.

Технологія вакуумно-дугового розряду також може бути використана як засіб забезпечення тяги для невеликих супутників завдяки реактивній силі, яка виникає при розширенні потоку плазми з області катодних плям дугового розряду.

Реактивна сила виникає в результаті розширення плазмового потоку в зоні катода. Цей потік розширюється із надзвуковою швидкістю, і ця швидкість досягається вже на відстані 2-х – 3-х радіусів катодної плями. Сила, створена катодом, пропорційна струму і може бути виражена через відношення сили до струму. Тяга вакуумно-дугового реактивного двигуна залежить від маси іонів, іонного струму, швидкості плазми і коефіцієнта заряду іонів, тобто величин, що є фундаментальними характеристиками матеріалу катода, а також від струму розряду. Теоретично реактивна сила вакуумно-дугового розряду на алюмінієвому катоді може досягати 13,64 мН/кВт [4]. Дослідження реактивної тяги вакуумно-дугових двигунів показали величину (8,7 – 13,9) мН/кВт [12].

Постановка задачі. В науково-технічній літературі описані різні конструкції електричних ракетних двигунів на металевій плазмі, але основна увага при їх розробці була спрямована на створення імпульсних двигунів малої потужності. Імпульсні вакуумно-дугові реактивні двигуни розвивають дуже низьку тягу (від одиниць мікроньютонів до одиниць міліньютонів), та мають невелику масу електрода, який використовується для одержання потоку плазми (від одиниць до десятків грамів), тому вони можуть бути використані лише в системах орієнтації наносупутників (маса (1 – 10) кг) та мікросупутників (маса (10 – 100) кг) [7–11].

У вказаних двигунах використовуються дугові розряди тривалістю від кількох мікросекунд до кількох мілісекунд. Вказані значення імпульсів зумовлені тим, що в цих конструкціях використовуються індуктивні джерела жи-

влення розряду, або джерела живлення розряду з конденсаторами порівняно невеликої ємності.

Вакуумно-дугові розряди постійного струму або розряди секундної тривалості практично не розглядались для використання в двигунах на металевій плазмі, оскільки для цього необхідні потужні джерела енергії, які можна встановлювати на борту космічних апаратів. Нещодавній прогрес у галузі високоефективних сонячних елементів та інших систем енергопостачання (у тому числі мініатюрних термоядерних систем, придатних для використання в космосі) відродив інтерес до потужних рушійних систем на основі вакуумної дуги.

Протягом останніх кількох років з'явилися публікації, в яких описані електричні ракетні двигуни на металевій плазмі з тягою близько десяти міліньютонів [12–14]. Такі двигуни мають значно ширший спектр використання. Відомі конструкції таких двигунів включають декілька однакових блоків (від двох до восьми), змонтованих в єдину систему. Кожен блок включає в себе металевий катод та систему електроживлення. Катоди можуть бути циліндричними (діаметр (30 – 60) мм) або прямокутними (близько (20-х – 50) мм) і масою декілька сотень грамів. У зв'язку з тим, що в цих конструкціях двигунів катодні плями дугового розряду переміщуються по поверхні катодів хаотично, ерозія їх поверхні вкрай нерівномірна, що значно знижує можливий ресурс роботи двигуна. Збільшення площі поверхні катодів приводить до ще більшої нерівномірності ерозії.

Актуальною проблемою є вирішення науково-практичної задачі розробки та дослідження електричних реактивних двигунів на металевій плазмі з підвищеним ресурсом роботи. Для цього необхідний значний запас матеріалу катода, який є джерелом плазми. Збільшення розмірів катода приводить до необхідності забезпечення їх рівномірного випаровування катодними плямами дугового розряду, що може бути здійснено керованим переміщенням катодних плям по поверхні катода.

Концепція вакуумно-дугового двигуна з дисковим катодом.

Конструкція вакуумно-дугового реактивного двигуна на металевій плазмі повинна відповідати таким вимогам:

- надійний запуск та підтримка дугового розряду в широкому діапазоні струмів;
- локалізація катодних плям на робочій поверхні катода;
- оптимальна діаграма спрямованості плазмових потоків;
- максимальний коефіцієнт використання матеріалу катода (відношення ваги відпрацьованого катода до ваги вихідного);
- достатній запас матеріалу, який випаровується, що визначається початковими розмірами катода.

Для забезпечення високого ресурсу роботи реактивного двигуна на металевій плазмі необхідно мати достатню масу матеріалу катода, який є джерелом плазми. Також доцільно вибрати велику площу робочої поверхні катода для запобігання перегріву катода при великих значеннях розрядного струму. Оптимальним варіантом є вибір дискової форми катода. Для досягнення рівномірного випаровування катода необхідно забезпечити кероване переміщення катодних плям дугового розряду по його робочій поверхні. Кероване переміщення катодних плям доцільно здійснити за допомогою магнітного поля. В сучасних вакуумно-дугових випарниках металів, які використовують для нанесення покриттів, широко застосовується метод керування перемі-

щенням катодних плям дугового розряду за допомогою магнітного поля, силові лінії якого мають аروحну конфігурацію [15]. Силові лінії такого поля розташовані над катодом і мають вигляд дуг (арок). Катодна пляма рухається всередині такої арки, де перпендикулярна складова магнітного поля дорівнює нулю (вершина арки). Катодні плями переміщуються під аркою силових ліній магнітного поля. При незмінному магнітному полі катодні плями будуть переміщатись по одній і тій же траєкторії, і через деякий час внаслідок випаровування металу на поверхні катода з'являється кільцева канавка. Для того, щоб максимально використати матеріал катода, необхідно переміщати катодні плями дугового розряду по всій його поверхні, для чого необхідно або переміщувати магнітну систему, яка створює магнітне поле аروحної конфігурації, або періодично змінювати конфігурацію магнітного поля.

В роботі [16] для підвищення коефіцієнта використання матеріалу катода електродугового випарника для нанесення покриттів використали електромагнітну систему, що складається з двох соленоїдів, яка створює на поверхні катода аручне магнітне поле. Змінюючи співвідношення струмів у соленоїдах магнітної системи, можна було змінювати кривизну ліній арукового магнітного поля та радіус кругового руху катодної плями.

Для електродугового випарника металів, який використовується в установках для нанесення покриттів, вага випарника має другорядне значення. Але враховуючи необхідність досягнення мінімальної ваги реактивного двигуна на металевій плазмі, доцільно замінити один з соленоїдів постійним магнітом.

Таким чином, необхідно розробити реактивний двигун на металевій плазмі, який буде включати в себе дисковий катод з металу, який буде випаровуватись, та магнітну систему з постійного магніту, розташованого під робочою поверхнею катода, та соленоїда, розташованого на периферійній області дискового катода. Крім того, необхідно створити систему ініціювання дугового розряду, захистити неробочу поверхню катода екранами та забезпечити розташування анода дугового розряду в зоні потоку плазми.

Розробка та дослідження двигуна з дисковим катодом. Для проведення попередніх досліджень розроблено та виготовлено експериментальний вакуумно-дуговий двигун з дисковим катодом діаметром 95 мм, осьовий переріз якого приведено на рис. 1 [17].

В корпусі 1 з ізолюючого матеріалу встановлений катод 2, нижня поверхня якого є робочою, по якій переміщуються катодні плями дугового розряду. Екран 3 закриває бічну поверхню катода 2 і не дозволяє катодним плямам переміщуватись з робочої поверхні катода на неробочу поверхню. Анод 4 встановлений в центрі двигуна. Електрод ініціювання дугового розряду 6 ізолюваний від анода ізолятором 5, а від катода – ізолятором 7. Кільцевий керамічний ізолятор 8 розташований між робочою поверхнею катода та електродом ініціювання розряду 6. При подачі на електрод 6 високовольтного імпульсу виникає розряд по боковій поверхні ізолятора 8, який ініціює дуговий розряд між катодом 1 та анодом 4. Катодні плями дугового розряду переміщуються по робочій поверхні катода по кільцевій траєкторії, утворюючи потоки металевої плазми, направлені від робочої поверхні катода. Ці потоки плазми і створюють реактивну тягу.

Рівномірне випаровування катода забезпечує магнітна система, яка складається з центрального дискового магніту 12 та периферійного соленоїда 17.

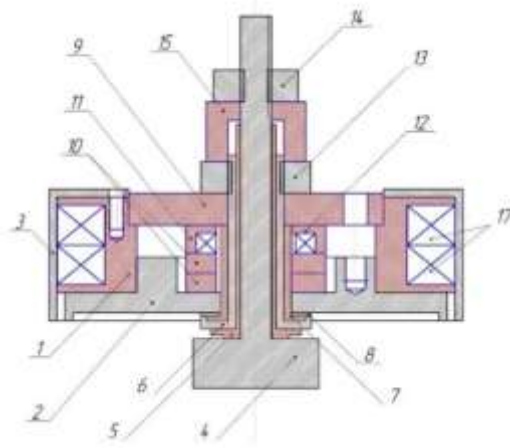


Рис. 1 – Осьовий переріз експериментального вакуумно-дугового двигуна з дисковим катодом діаметром 95 мм

В роботі [18] приведені результати дослідження параметрів вказаної магнітної системи електродугового ракетного двигуна на металевій плазмі. Проведені дослідження магнітного поля електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі з різними постійними магнітами та з різними варіантами роботи керуючих соленоїдів показали, що використання комбінації постійного магніту та соленоїда забезпечує можливість зміни траєкторії переміщення катодних плям дугового розряду по всій поверхні катода.

Аналіз отриманих результатів. Випробування електродугового двигуна на металевій плазмі проводили в вакуумній камері при остаточному тиску $5 \cdot 10^{-3}$ Па.

На рис. 2 показані фотографії траєкторії переміщення катодних плям на робочій поверхні дискового катода електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі в вакуумній камері. На рис. 2, а) – траєкторія переміщення катодних плям дугового розряду при відсутності струму в периферійному соленоїді, на рис. 2, б) – при величині струму 10 А в периферійному соленоїді.



а



б

а) – індукція магнітного поля 3 мТ,
б) – індукція магнітного поля 12 мТ

Рис. 2 – Траєкторія переміщення катодних плям

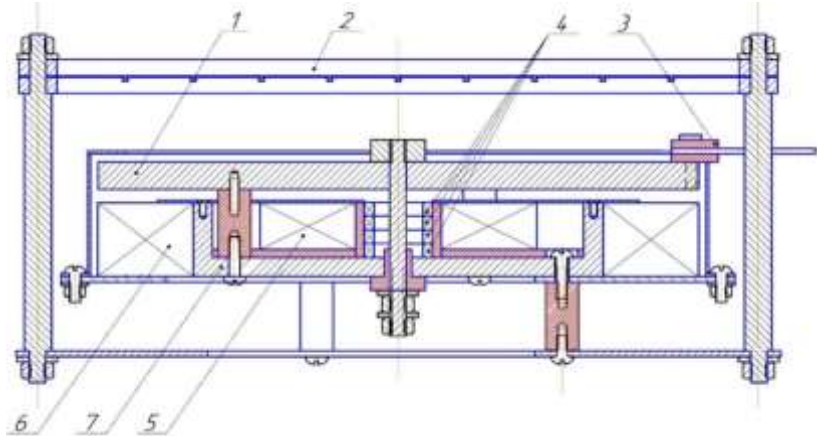
Проведені експерименти показали, що при зміні струму периферійного соленоїда змінюється радіус траєкторії руху катодних плям, що підтверджує

концепцію можливості управління траєкторією руху за допомогою комбінованої магнітної системи, яка складається з постійного магніту та соленоїдів.

На основі аналізу результатів дослідження роботи експериментальної конструкції двигуна з дисковим катодом діаметром 95 мм розроблено новий експериментальний зразок двигуна. Діаметр катода збільшено до 195 мм, використані тільки керамічні ізолятори, а також встановлено допоміжний анод у вигляді набору вольфрамових стрижнів.

На рис. 3 приведено осьовий переріз вакуумно-дугового двигуна з дисковим катодом збільшеного діаметра (195 мм) та керамічними ізоляторами. Він включає в себе такі елементи: 1 – катод, 2 – анод, 3 – пристрій ініціювання розряду, 4 – постійні магніти, 5 – внутрішній соленоїд, 6 – зовнішній соленоїд, 7 – магнітопровід. Дисковий катод 1 встановлений на магнітопроводі 7 через опорні ізолятори. На магнітопроводі 7 встановлені три магнітні системи.

Перша магнітна система включає чотири магнітних кільця 4, виготовлених з самарій-кобальтового сплаву та магнітопровід 7. Силкові лінії магнітного поля на поверхні катода 1 мають конфігурації арки, що забезпечує переміщення катодних плям дугового розряду по кільцевій траєкторії.



1 – катод, 2 – анод, 3 – пристрій ініціювання розряду, 4 – постійні магніти, 5 – внутрішній соленоїд, 6 – зовнішній соленоїд, 7 – магнітопровід

Рис. 3 – Осьовий переріз експериментального ЕРДМП з дисковим катодом діаметром 195 мм

Друга магнітна система включає в себе внутрішній соленоїд 5, який має 100 витків мідного дроту діаметром 2 мм та магнітопровід 7. Зміною величини струму через обмотку соленоїда 5 можна змінювати величину індукції та конфігурацію силових ліній магнітного поля, змінюючи цим траєкторію та швидкість переміщення катодних плям по поверхні катода.

Третя магнітна система включає в себе зовнішній соленоїд 6, який має 100 витків мідного дроту діаметром 2 мм та магнітопровід 7. Зміною величини струму через обмотку соленоїда 6 можна змінювати величину індукції та конфігурацію силових ліній магнітного поля, змінюючи цим траєкторію та швидкість переміщення катодних плям по поверхні катода.

Комбінацією цих трьох магнітних систем можна забезпечити зміну в широких межах індукції магнітного поля та конфігурації його силових ліній, що дозволяє провести дослідження тяги реактивного двигуна на металевій плазмі.

Для ініціювання дугового розряду на периферійній частині катода 1 встановлений блок ініціювання дугового розряду, який включає в себе електрод ініціювання розряду, ізолятор та фіксатор електроду. Блок ініціювання дугового розряду аналогічний відомим системам ініціювання дугового розряду в електродугових випарниках металу (наприклад, в установках типу БУЛАТ).

Зовнішній вигляд двигуна з дисковим катодом діаметром 195 мм показано на рис. 4.

Дослідження вакуумного-дугового двигуна з дисковим катодом проводили в вакуумній камері при остаточному тиску $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Для вимірювання тяги використовували електронні ваги PS 6000.R2 RADWAG з виведенням даних через інтерфейс RS-232C.

Електронні ваги встановлювали в вакуумній камері, на їх робочий стіл встановлювали металевий диск, а на нього ставили вакуумно-дуговий двигун. Через ілюмінатор проводили відеозапис катодних плям дугового розряду за допомогою камери OLYMPUS OM-D EM-5. Реєстрація величини струму та напруги дугового розряду проводилась за допомогою програми LabVIEW.



а



б

а) – без допоміжного аноду, б) – з встановленим допоміжним анодом

Рис. 4 – Зовнішній вигляд двигуна з дисковим катодом діаметром 195 мм

На рис. 5 показано траєкторії переміщення катодних плям дугового розряду з величиною струму 120 А при різних величинах струму зовнішнього соленоїда. При відсутності струму в соленоїдах на робочій поверхні катода є тільки магнітне поле, створене постійним магнітом, розташованим в центрі дискового катода. В цьому випадку траєкторія переміщення катодних плям, які переміщуються під аркою силових ліній магнітного поля постійного магніту, має мінімальний діаметр (рис. 5, в)). При максимальному значенні струму в периферійному соленоїді траєкторія переміщення катодних плям дугового розряду має максимальний діаметр (рис. 5, а)). Пояснюється це тим, що магнітне поле периферійного соленоїду деформує арку силових ліній магнітного поля постійного магніту і вершина арки розташовується на більшій відстані від центра катода. При меншому значенні магнітного поля периферійного соленоїду діаметр траєкторії переміщення катодних плям зменшується (рис. 5, б)).

Проведені випробування двигуна з дисковим катодом при різних конфігураціях магнітного поля та різних значеннях струму дугового розряду. Величини розрядного струму, напруги між анодом та катодом в залежності від струму соленоїда (індукції магнітного поля) вказані в таблиці 1.

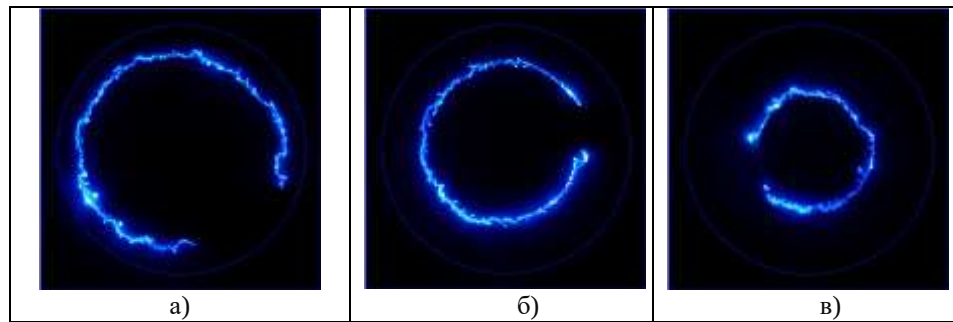


Рис. 5 – Траскторії переміщення катодних плям при різних величинах струму зовнішнього соленоїда: а) – 12 А, б) – 8 А, в) – 0 А).

Таблиця 1

№№	Струм дугового розряду, А	Напруга дугового розряду, В	Величина реактивної тяги, мН	Питома реактивна тяга, мН/кВт
1	111,9	35,8	17,44	4,35
2	189,8	38,4	44,79	6,15

Керування переміщенням катодних плям можна також здійснити за допомогою магнітного поля периферійного та центрального соленоїдів без постійного магніту. Проведені експерименти показали, що практично немає різниці між вказаними методами керування. Враховуючи, що постійний магніт має значно меншу масу та не потребує окремого джерела живлення, для вакуумно-дугового реактивного двигуна доцільно використовувати систему керування переміщенням катодних плям на основі комбінації соленоїда та постійного магніту.

Величину тяги визначали як різницю величин ваги вакуумно-дугового двигуна при наявності розряду та ваги двигуна без розряду. Цей метод дозволяє провести оцінку величини тяги з невеликою точністю, але завдяки його простоті може бути проведений великий обсяг досліджень для вибору оптимальної конструкції двигуна. Величину тяги відносно величини розрядного струму визначали шляхом поділення одержаного значення реактивної тяги на величину розрядного струму.

На рис. 6 та рис. 7 приведено зведені графіки зміни напруги, струму та ваги вакуумно-дугового двигуна при різних значеннях струму розряду. На початковий момент напруга на електродах вакуумно-дугового двигуна дорівнює вихідній напрузі джерела живлення (75 В), вага двигуна з опорним диском – 5856,9 г.

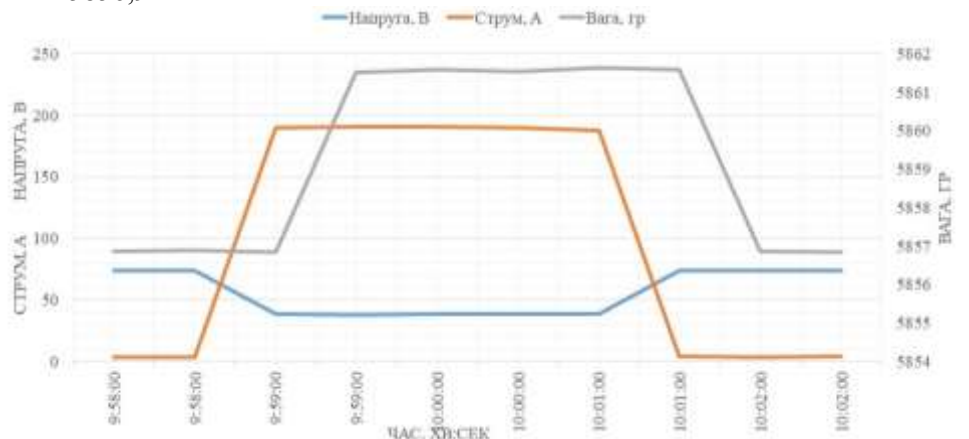


Рис. 6 – Зведений графік зміни струму, напруги та ваги двигуна при дуговому розряді з величиною струму 189,8 А та тривалістю 2 с

В момент ініціювання дугового розряду напруга між анодом та катодом двигуна зменшується до величини 38,4 В при величині струму 189,8 А, а величина показань на вагах збільшується до 5861,43 г за рахунок реактивної сили, створюваної вакуумно-дуговим двигуном (рис. 6). Показання ваги запізнюються відносно моменту ініціювання, що пояснюється інертністю системи вимірювання. В момент відключення джерела живлення напруга на електродах і струм розряду зменшуються до нуля, а вага з тим же запізненням зменшується до вихідного значення. Різниця в показаннях ваги становить 4,57 г, що відповідає величині тяги близько 44,79 мН. Питома реактивна тяга обчислювалась, як результат ділення виміряного значення реактивної тяги на величину потужності розряду.

На рис. 7 приведено зведений графік зміни параметрів вакуумно-дугового двигуна при струмі розряду 111,9 А. Зміна ваги за рахунок реактивної тяги становить 1,78 г, що відповідає величині тяги близько 17,44 мН. Питома реактивна тяга – 4,35 мН/кВт.

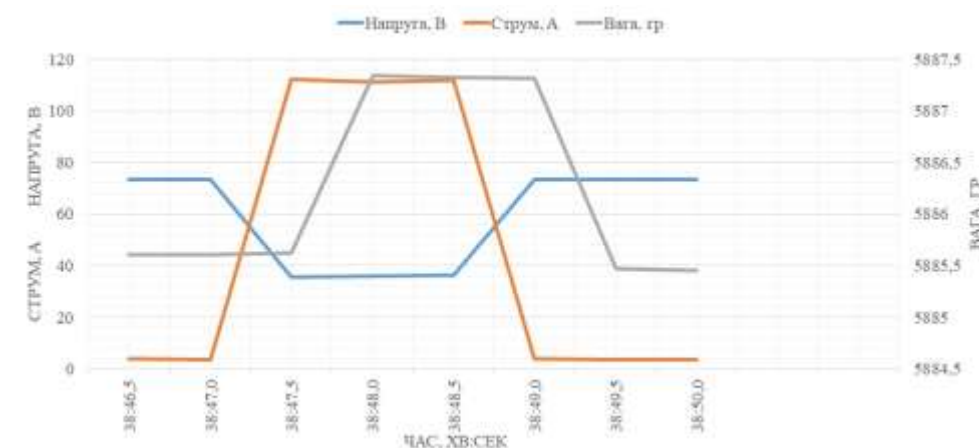


Рис. 7 – Зведений графік зміни струму, напруги та ваги двигуна при дуговому розряді з величиною струму 111,9 А та тривалістю 1 с

В роботі [12], в якій досліджено параметри вакуумно-дугового двигуна Xantus X4, приведені значення питомої реактивної тяги (8,7 – 13,9) мН/кВт. Одержані в цій роботі величини питомої реактивної тяги значно нижчі, що може бути пов'язано з тим, що при переміщенні катодних плям під аркою силових ліній магнітного поля напруга на розряді, а отже і енерговитрати, значно більші (35 – 38) В, ніж при відсутності магнітного поля (20 – 25) В. Тому відношення тяги до енерговитрат розряду в магнітному полі буде нижче, ніж при відсутності магнітного поля.

Рекомендації. На основі проведених досліджень розроблені рекомендації для інженерної розробки вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі.

1. Для забезпечення рівномірного випаровування катода для підвищення ресурсу роботи вакуумно-дугового двигуна на металевій плазмі доцільно використовувати магнітне поле аروحної конфігурації.

2. Для зміни траєкторії переміщення катодних плям можна використовувати комбінацію соленоїду та постійного магніту, що зменшить вагу двигуна, та енерговитрати на його експлуатацію.

3. Використання імпульсів дугового розряду тривалістю від сотень мілісекунд до одиниць секунд забезпечить збільшення загальної тяги двигуна порівняно з короткими імпульсами мікросекундної тривалості.

Висновки.

1. Розроблено та виготовлено два експериментальних реактивних вакуумно-дугових двигуна з дисковими катодами різного діаметра.
2. Проведено дослідження реактивної тяги вакуумно-дугових двигунів з дисковими катодами різного діаметра.
3. Встановлено закономірності переміщення траєкторії катодних плям дугового розряду під впливом магнітного поля.

1. O'Reilly D., Herdrich G., Kavanagh D. F. Electric Propulsion Methods for Small Satellites: A Review. Aerospace. 2021. vol. 8, No. 1, Art. no. 22. <https://doi.org/10.3390/aerospace8010022>
2. Kolbeck J., Anders A., Beilis II, Keidar M. Micro-propulsion based on vacuum arcs. J Appl Phys. 2019. Vol.125. <https://doi.org/10.1063/1.5081096>
3. Pietzka M. Development and Characterization of a Propulsion System for CubeSats Based on Vacuum Arc Thrusters. Ph.D. Thesis, University of the Bundeswehr Munich, Munich, Germany, 2016. 177 pp.
4. Polk J. E., Sekerak M. J., Ziemer J. K., Schein J., and Anders A. A. Theoretical analysis of vacuum arc thruster and vacuum arc ion thruster performance. IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. Vol. 36, No. 5. P. 2167–2179. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2004374>
5. Krishnan M., Velas K., and Leemans S. Metal Plasma Thruster for Small Satellites. AIAA Journal. 2020. Vol. 36, No. 4. P. 535–539. <https://doi.org/10.2514/1.B37603>
6. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. Springer Science Business Media. New York. 2008. 540 pp. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-79108-1>
7. Lun J. Performance improvement of vacuum arc thrusters. A thesis submitted to the Faculty of Engineering and the Built Environment at the University of the Witwatersrand, Johannesburg, in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. 2015. 270 pp.
8. Marvin Kühn and Jochen Schein. Development of a High-Reliability Vacuum Arc Thruster System. Journal of Propulsion and Power. 2022. Vol. 38, No 5. P. 752–758. <https://doi.org/10.2514/1.B38202>
9. Taploo A., Jake Spinelli J., Michael Keidar J. Toward achieving longevity of micro cathode thrusters. Guru Sankar Duppada. Appl. Phys. Vol. 138, No 2. <https://doi.org/10.1063/5.0273158>
10. Schein J., Qi N., Binder R., Krishnan M., Ziemer J. K., Polk J. E., & Anders A. Inductive Energy Storage Driven Vacuum Arc Thruster. Review of Scientific Instruments. 2022. Vol. 73, No.2. P. 925–927. <https://doi.org/10.1063/1.428784>
11. Спірін Є. В., Надтока В. М. Електричні реактивні двигуни на металевій плазмі. Космічна техніка. Ракетне озброєння. 2025. Вип. 2 (123). С. 24–34. <https://doi.org/10.33136/stma2025.02.024>
12. Frankovich J. K., Krishnan M., Mackey J. et al. Qualification of a pulsed, millinewton class metal plasma thruster for broad mission applications. J Electr Propuls. 2025. Vol. 4, No. 65. <https://doi.org/10.1007/s44205-025-00139-9>.
13. Kent Frankovich, Mahadevan Krishnan. Metal plasma thruster (MPT): from garage to orbit in 4 years. 3AF Space Propulsion Conference in Glasgow, Scotland, 20 – 23 May 2024.
14. Krishnan M, Frankovich J. K., and Mackey J. Impulse Bit Measurements from Metal Plasma Thruster. Journal of Propulsion and Power. 2021. Vol. 37, No. 4. Pp. 577–583. <https://doi.org/10.2514/1.B38191>
15. Sethuraman S. K., Barrault M. R. Study of the Motion of Vacuum Arcs in High Magnetic Field. Journal of Nuclear Materials. 1980. Vol. 93–94. P. 791–798. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(80\)90209-3](https://doi.org/10.1016/0022-3115(80)90209-3)
16. Духопельников Д. В., Кириллов Д. В., Рязанов В. А., Наинг Чжоу Вин. Оптимизация траектории движения катодного пятна для повышения равномерности выработки катода вакуумного дугового испарителя. Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1042.html> (дата звернення 19.11.2013).
17. Спірін Є. В. Електрореактивний двигун малої тяги з використанням електродугового розряду. XXV Міжнародна конференція «Людина і космос»: тези доп. XXV Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції «Людина і Космос» м. Дніпро 12–14 квітня 2023 р. Національний центр аеро-космічної освіти молоді ім. О. М. Макарова. Дніпро, 2023. С. 50–51.
18. Спірін Є., Надтока В. Дослідження магнітного поля електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі. Журнал ракетно-космічних технологій. 2024. Вип. 33, № (4–28). С. 45–48.

Стаття надійшла до редакції 26.05.2026;
прийнято до друку після рецензування 26.06.2026;
дата публікації 02.07.2026.