УДК 621.3.022:621.396.6:533.93 https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.10

К.В. Коритченко, В.Ф. Болюх, С.Г. Буряковський, Ю.В. Кашанський, О.І. Кочерга

Електромеханічні та теплофізичні процеси в імпульсному індукційному прискорювачі плазмового утворення

Вступ. *Роботи по створенню та метанню плазмових утворень різними способами ведуться в провідних наукових центрах світу. Досягнуто формування плазмового утворення тривалістю декілька мілісекунд та його метання у відкритому атмосферному середовищі на відстань 0,5-0,6 м. Для створення плазми використовують енергію первинного розрядного кола з подальшим прискоренням газоплазмового утворення за допомогою енергії вторинного кола. Плазмове утворення отримують і за рахунок електричного вибуху провідника.* ***Метою*** *статті є теоретичне та експериментальне дослідження електромеханічних та теплофізичних процесів в імпульсному індукційному прискорювачі, який забезпечує формування плазмового утворення за рахунок термічної іонізації в результаті електричного вибуху провідника та метання його у атмосферному середовищі відносно індуктора.* ***Методика.*** *Для аналізу електромеханічних та теплофізичних процесів в імпульсному індукційному прискорювачі плазмового утворення (ІІПП) розроблена і реалізована в програмному пакеті Comsol Multiphysics математична модель прискорювача, в якій якір не змінює своєї форми і агрегатного стану в процесі роботи та враховує розподілені у просторі параметри.* ***Результати.*** *Розраховані електромеханічні і теплові характеристики прискорювача. Показано, що перевищення температури в якорі, що виконаний у вигляді алюмінієвої фольги, суттєво нерівномірно. Максимальне значення температури має місце в середній частині фольги ближче до зовнішнього краю, причому ця температура значно перевищує температуру кипіння алюмінію.* ***Наукова новизна.*** *Проведені експериментальні дослідження ІІПП, у якого якір виконаний з алюмінієвої та мідної фольги, а індуктор, що підключається до високовольтного ємнісного накопичувача енергії, виконаний у вигляді плоскої дискової спіралі. В процесі роботи ІІПП якір переходить в плазмовий стан і переміщується вертикально вверх, перетворюючись в об'ємний комок, або на скупчення маленьких частинок, які здіймались на декілька метрів відносно індуктора. Експериментально показано характерний круговий контур термічного нагрівання мідної фольги якоря, яка закріплена на листі склотекстоліту.* ***Практична цінність.*** *Результати експериментальних досліджень з точністю до 15 % співпадають з розрахунковими і показують справедливість концепції ІІПП, в якому за рахунок високої густини індукованого струму в якорі відбувається термічна іонізація в результаті електричного вибуху провідника з переходом його в плазмовий стан. Взаємодія плазмового утворення з магнітним полем індуктора призводить до появи електродинамічної сили, яка забезпечує його переміщення у відкритому атмосферному середовищі на декілька метрів.* Бібл. 17, рис. 9.

Ключові слова: **імпульсний індукційний прискорювач плазмового утворення, математична модель, електромеханічні та теплові процеси, експериментальні дослідження.**

Вступ. Плазмові технології знаходять застосування у різних конструктивних і технологічних системах та пристроях, в наукових дослідженнях та ін. Одним з напрямків таких досліджень є формування плазмових утворень та метання їх на певну відстань від джерела формування. Такі роботи ведуться в провідних наукових центрах світу, насамперед в США: Принстонська лабораторія фізики плазми, Лос-Аламовська національна лабораторія, університет Нью-Гемпшира, Свортморська лабораторія магнітодинаміки та ін. [1-4]. В університеті штату Міссурі (США) досліджується прискорення плазмового утворення у відкритому атмосферному середовищі [5]. Тривалість існування плазмового утворення складає декілька мілісекунд, і воно переміщується у повітрі на незначну відстань 0,5-0,6 м.

Для утворення плазми використовують енергію первинного розрядного кола [6]. Формування плазми у формі кільця відбувається за рахунок газодинамічного процесу турбулізації газоплазмового струменя. Прискорення газоплазмового утворення здійснюється за допомогою енергії вторинного кола. Вихід термічної плазми з форкамери забезпечується газодинамічними, а не електродинамічними силами.

Плазмове утворення формують і за рахунок електричного вибуху провідника в швидко спадаючому магнітному полі [7]. Магнітне поле утворюється за рахунок струму, що тече по плазмі, яка сформована у формі спіралі у сліді вибуху провідника. Для створення умов стійкості кільця за рахунок енергії магнітного поля передбачається переривання процесу повернення енергії магнітного поля в електричну енергію заряду конденсатора.

В індукційних плазмотронах для формування плазмового кільця застосовують метод індукування розряду у газовому середовищі низького тиску з подальшим збільшенням до атмосферного, або формування плазми у області біля індуктора за рахунок дугового розряду [8-10]. Плазмотрони забезпечують індукування вихрового струму у плазмовому утворенні у атмосферних умовах, але не вирішують проблеми накопичення енергії магнітного поля у плазмовому утворенні.

Аналіз прискорювачів плазмових утворень. Відомий імпульсний плазмовий прискорювач, що містить електроди, один з яких виконаний у вигляді мідного стрижня, а інший у вигляді пластини. Під дією електричного розряду між електродами в твердій діелектричній речовині відбувається абляція [11]. Робота прискорювача здійснюється за низького тиску газу в прискорювальному каналі. Відомий також імпульсний плазмовий прискорювач, який містить прискорювальний канал, утворений двома електродами з розташованим між ними тефлоновим ізолятором, який є робочою речовиною [12].

Ці прискорювачі мають низьку ефективність і питому потужність, що обумовлено використанням тільки енергії, що запасається електричним полем для прискорення. Ефективність цих прискорювачів обмежується тривалим процесом створення робочої речовини через обмежену швидкість і нерівномірність її випаровування.

© К.В. Коритченко, В.Ф. Болюх, С.Г. Буряковський, Ю.В. Кашанський, О.І. Кочерга

Відомий плазмовий прискорювач, який містить електроди, що з'єднані через омічне і індуктивне навантаження з ємнісним накопичувачем енергії (ЄНЕ), торцевий керамічний ізолятор, який розділяє електроди і встановлені між електродами діелектричні шашки, що виконані з матеріалу, в якому відбувається абляція [13]. При подачі на електроди високовольтного імпульсу в результаті поверхневого пробою формується плазмове утворення, яке коротить електроди прискорювача. Робоча речовина, що випаровується з поверхні діелектричних шашок, іонізується і прискорюється під дією електромагнітних сил і газодинамічного тиску. В цьому прискорювачі підвищено ефективність прискорення за рахунок використання як електромагнітних сил, так і газодинамічного тиску. Однак в нього низька питома потужність через використання тільки електричної енергії для створення електромагнітних і газодинамічних сил.

Відомий плазмовий прискорювач, який складається з циліндричної напрямної труби, зовнішнього полого циліндричного магніту і системи термічної іонізації речовини до плазмового стану [14]. Один з торців труби знаходиться в повітряному середовищі, а на іншому торці розташована система формування газового потоку за допомогою газотурбінного двигуна. Система термічної іонізації речовини складається з розрядних електродів, що розташовані усередині напрямної труби, і індукційного нагрівача плазми. Електромагнітна котушка нагрівача, яка охоплює напрямну трубу, забезпечує формування плазми всередині напрямної труби. За рахунок газотурбінного двигуна формується нагрітий газовий потік, який спрямовується в циліндричну трубу. Нагрітий вище 1000 °С газ направляється в систему термічної іонізації, де його підігрівають дуговими розрядами до високої температури (5000-10000 °С). Газ надходить в область індукційного нагрівача, де відбувається утворення плазми в формі кільця. Під дією імпульсних магнітних полів, що почергово створюються магнітами, які розташовані вздовж циліндричної напрямної труби, відбувається прискорення плазмового утворення.

У цьому пристрої досягається висока питома потужність за рахунок комбінованого використання хімічної енергії згоряння палива і енергії електромагнітного поля. Але відомий прискорювач має занадто складну конструкцію.

Відомий індуктивний прискорювач, який забезпечує створення і прискорення плазми в повітряному середовищі [15]. Прискорювач складається з коаксіально встановлених нерухомого дискового індуктора, що збуджується від ЄНЕ, і розташованої напроти індуктора робочої речовини, яка при термічній іонізації за рахунок індукованого струму переходить в плазмовий стан з подальшим прискоренням вздовж коаксіальної осі під дією електродинамічних сил. Цей прискорювач має просту конструкцію, але плазма у вигляді кільця не може переміщуватись на велику відстань відносно індуктора. В плазмовому кільці виникають радіально направлені електродинамічні сили, які «розривають» кільце, а значить і переривають шлях протікання індукованого струму.

Таким чином, задача створення прискорювача плазмового утворення, який забезпечує його переміщення в повітряному середовищі на значну відстань, є актуальною.

Метою статті є теоретичне та експериментальне дослідження електромеханічних та теплофізичних процесів в імпульсному індукційному прискорювачі, який забезпечує формування плазмового утворення за рахунок термічної іонізації в результаті електричного вибуху провідника та метання його у атмосферному середовищі відносно індуктора.

Математична модель прискорювача. Складнощі розрахунку імпульсного індуктивного прискорювача плазмового утворення (ІППП) насамперед обумовлені невизначеністю параметрів плазмового утворення, які динамічно змінюються. Для визначення загальних характеристик електромеханічних та теплових процесів будемо вважати, що якір виконаний суцільним і не змінює своєї форми і агрегатного стану в процесі роботи прискорювача. Для реалізації математичної моделі з розподіленими у просторі параметрами використаємо систему диференціальних рівнянь в часткових похідних щодо просторових і часових змінних [16].

Математична модель електромагнітних процесів ІППП, яка включає нерухомий індуктор та рухомий електропровідний якір, представляється в циліндричній системі координат для векторного магнітного потенціалу $\vec{A}_i$, який має φ компоненту.

Диференційні рівняння відносно φ-ї складової векторного магнітного потенціалу в області індуктора Ω_1 дають вигляд:

$$\gamma_1 \frac{\partial A_{1\varphi}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0}\frac{\partial^2 A_{1\varphi}}{\partial z^2} + \frac{1}{\mu_0}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial (rA_{1\varphi})}{\partial r}\right) = -\frac{i_1(t)\cdot N_1}{S_1}k_{1s}, \quad (1)$$

в області суцільного електропровідного якоря Ω_2:

$$\gamma_2 \frac{\partial A_{2\varphi}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0}\frac{\partial^2 A_{2\varphi}}{\partial z^2} + \frac{1}{\mu_0}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial (rA_{2\varphi})}{\partial r}\right) - v_{z2}(t)\cdot\frac{\gamma_2}{\mu_0}\cdot\frac{\partial A_{2\varphi}}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

в області повітряного середовища Ω_0:

$$\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial^2 A_{0\varphi}}{\partial z^2} + \frac{1}{\mu_0}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial (rA_{0\varphi})}{\partial r}\right) = 0, \quad (3)$$

де $j_1(t)$ – тангенціальна складова густини струму в індукторі; $i_1(t)$ – миттєве значення струму в індукторі; γ_1, γ_2 – питома провідність індуктора та якоря відповідно; μ_0 – магнітна стала; $v_{z2}(t)$ – швидкість якоря; N_1 – кількість витків індуктора; S_1 – площа перетину індуктора; k_{1s} – коефіцієнт заповнення індуктора.

Диференційні рівняння (1) – (3) доповнюються відповідними граничними та початковими умовами:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\mu_0}\mathrm{rot}A_1\cdot n = -\frac{1}{\mu_0}\mathrm{rot}A_2\cdot n; \\ &\mathrm{rot}A_1\cdot n = -\mathrm{rot}A_2\cdot n; \\ &A_{1\varphi}(0) = A_{2\varphi}(0) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

де A_i – векторний потенціал магнітного поля i-ої області; n – одиничний вектор нормалі.

Аксіальна складова сили, яка діє на якір прискорювача, визначається за допомогою відповідної компоненти тензору натягу Максвелла T:

$$f_z = \oint_S 2\pi r T_z \mathrm{d}s = \frac{1}{\mu_0} \oint_S 2\pi r (B_r \cdot B_z) \mathrm{d}s, \qquad (5)$$

де B_r, B_z — радіальна та аксіальна складова індукції магнітного поля.

Електричний стан прискорювача можна описати рівняннями:

$$2\pi \frac{N_1}{S_1} \int_{S_1} \frac{\mathrm{d}rA_{1\varphi}}{\mathrm{d}t} \mathrm{d}r\mathrm{d}z + (L_0 + L_1)\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + i_1(R_0 + R_1) + u_C = 0, \qquad (6)$$

$$2\pi \frac{1}{S_2} \int_{S_2} \frac{\mathrm{d}rA_{2\varphi}}{\mathrm{d}t} \mathrm{d}r\mathrm{d}z + L_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + i_2 R_2 = 0, \qquad (7)$$

де L_0, R_0 – відповідно індуктивність та активний опір кола збудження; R_1, R_2 – відповідно активний опір індуктора і якоря; L_1, L_2 – відповідно індуктивність індуктора і якоря; i_2 – миттєве значення струму в якорі; S_2 – площа перетину якоря; u_C – напруга ЄНЕ, які доповнюється відповідними початковими умовами.

Теплові процеси в ІІПП описуються за допомогою рівняння:

$$c_k(T) \cdot \gamma_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial r}(\lambda_k(T)\frac{\partial T_k}{\partial r}) + \frac{1}{r}\lambda_k(T)\frac{\partial T_k}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_k(T)\frac{\partial T_k}{\partial z}) + \qquad (8) \\ + j_k^2(t) \cdot \rho_k(T),$$

де T_k – розподіл температури k-го активного елементу у просторі та часі; $c_k(T)$ – усереднена питома теплоємність k-го активного елементу (індуктора та якоря); γ_k – усереднена щільність матеріалу k-го активного елементу; $j_k(t)$ – густина струму k-го активного елементу; $\lambda_k(T)$ – коефіцієнт теплопровідності k-го активного елементу; $\rho_k(T)$ – питомий опір k-го активного елементу.

На охолоджуваних поверхнях активних елементів система рівнянь (8) доповнюється граничними умовами третього роду, що враховує конвективний і радіаційний теплообмін, а на осі симетрії граничними умовами другого роду.

Математична модель ІІПП з нерівномірним розподілом струмів в індукторі і якорі реалізується в програмному пакеті *Comsol Multiphysics* з використанням методу скінченних елементів при обліку всіх взаємозв'язків між фізичними процесами [17]. При цьому здійснюється обмін даних між процесами, виділення розрахункових областей для кожної фізичної задачі за умови узгодженості сіткового розбиття для всіх задач. Моделювання виконується в наступній послідовності:

- вибираються модулі фізики («Magnetic fields», «Electrical circuit», «Heat transfer in solid», «Fluid structure interaction»), які реалізують відповідні задачі, розмірності (2D), тип моделі (time-dependent) і методи розрахунку;
- формується геометрія прискорювача і визначаються розрахункові області для обраних фізичних задач;
- задаються вихідні дані у вигляді постійних величин і функцій, що описують взаємозв'язок між параметрами, наприклад, залежність питомого опору від температури;
- задаються початкові і граничні умови розглянутих фізичних задач;
- виконується дискретизація розрахункових областей з урахуванням геометричної моделі електродинамічного прискорювача;
- обираються методи вирішення розглянутих завдань MUMPS, PARDISO і проводяться чисельні розрахунки.

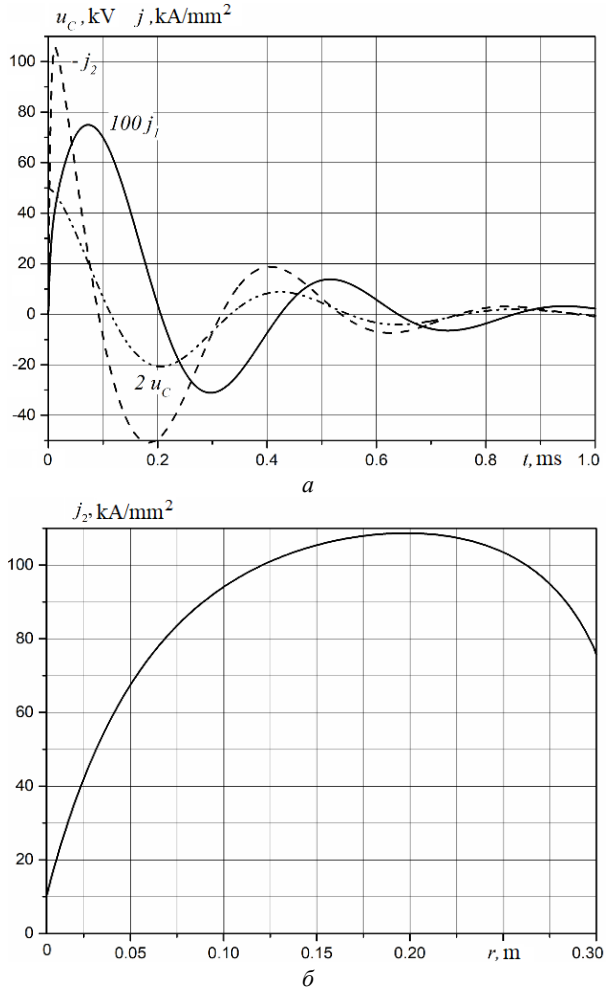
Розрахункова область моделі представляла собою циліндр з радіусом, значення якого більше, ніж в 5 рази перевищувала радіус найбільш віддаленого елемента прискорювача в радіальному напрямку від осі z. Висота розрахункового циліндра більше, ніж в 10 разів перевищувала найбільшу висоту елементів прискорювача. Це дозволяло домогтися необхідної точності при прийнятному часу розрахунку, вважаючи границю розрахунку умовно нескінченою.

В моделі використовувалася сітка типу «Free triangular» з розмірами елементів «Extra fine» (максимальний розмір елемента сітки для віддалених областей навколишнього середовища становив 5 мм, а для прискорювача розмір елемента сітки вибирався в інтервалі від (0,001 до 1 мм). Відносне переміщення елементів прискорювача між собою зумовило застосування автоматичної перебудови сітки Automatic remeshing (критерій перебудови сітки mod1.fsi.minqual>0,2). Просторова дискретизація полягає в розбитті обмеженої області на окремі кусково безперервні підобласті. Сукупність таких елементів визначається як сітка або тріангуляція, яка є моделлю розрахункової області. Причому для кожного з фізичних модулів («Magnetic fields», «Electrical circuit», «Heat transfer in solid») використовувалася інтерполяція рішення для окремих кінцевих елементів, що визначається квадратичною або кубічною дискретизацією. Основні змінні апроксимуються вузловими значеннями, помноженим на базисний вектор, який необхідний для інтерполяції всередині елемента. Для апроксимації по часу використовується неявна кінцево-різницева схема п'ятого порядку.

Електромеханічні і теплові процеси прискорювача. Розглянемо ІІПП, у якого нерухомий індуктор виконаний у вигляді плоскої спіралі зі сталі, а якір виконаний у вигляді алюмінієвої фольги дискової форми, що коаксіально розташована відносно індуктора. Параметри ІІПП наступні: **ЄНЕ**: напруга U_0 = 25 кВ, ємність C_0 = 360 мкФ; **індуктор**: кількість витків N_1 = 7, внутрішній діаметр D_{in} = 10 мм, зовнішній діаметр D_{ex} = 600 мм, площа поперечного перетину витка $S_1 = 5\times25 = 125$ мм^2; **якір**: товщина h_2 = 8 мкм; зовнішній діаметр D_{ex} = 600 мм, відстань від індуктора z_0 = 0,5 мм; **коло збудження**: L_0 = 1,5 мкГн, R_0 = 50 мОм.

На рис. 1 представлені розраховані характеристики ІІПП, а саме зміна напруги ЄНЕ u_C, густини струму в індукторі j_1 та якорі j_2 (*а*), густина струму в якорі, розподілена по його радіусу в момент максимуму струму (*б*).

Відбувається неодночасне зростання максимальних значень струмів в індукторі і якорі. Струм в якорі досягає максимального значення через близько 0,15 мс, в той час як в індукторі – через близько 0,75 мс. Причому густина індукованого струму в якорі по поперечному перетину в радіальному напрямку нерівномірна: в середній частині ближче зо зовнішнього краю сягає максимального значення j_2 = 118 кА/мм^2, а на зовнішньому краю зменшується до j_2 = 76 кА/мм^2.



а

б

Рис. 1. Розраховані характеристики ІІПП: *а* – зміна напруги ЄНЕ та густини струму в індукторі та якорі; *б* – розподіл густини струму в якорі в момент максимуму індукованого струму

На рис. 2 показані електродинамічна сила f_{z2}, швидкість v_z та переміщення h_z якоря. Максимальне значення електродинамічної сили відштовхування сягає близько f_{z2} = 185 кН. Але через фазовий зсув між струмами в індукторі і якорі в інтервалі 0,9 – 2,1 мс на якір діє електродинамічна сила тяжіння, яка значно менша за силу відштовхування. Внаслідок такого характеру сили швидкість якоря сягає максимального значення близько v_z = 113 м/с в момент 0,08 мс, після чого швидкість зменшується до 66 м/с в момент 0,2 мс після початку робочого процесу з незначним збільшенням потому.

На рис. 3 показані зміна та радіальний розподіл в момент максимуму струму перевищення температури якоря θ_2. Зміна θ_2 у часі обумовлена характером зміни щільності струму в якорі j_2. Перевищення температури збільшується до значення близько θ_2= 4200 °С в момент 0,6 мс від початку робочого процесу. Після чого спостерігається незначний спад до θ_2 = 4000 °С з поступовим збільшенням до θ_2 = 6300 °С і вище після 0,25 мс.

Але перевищення температури розподілено по поперечному перетину якоря (алюмінієвої фольги) в радіальному напрямку суттєво нерівномірно. В центрі фольги θ_2 = 0. Максимальне значення θ_2 = 7900 °С має місце в середній частині якоря ближче до зовнішнього краю. Зазначимо, що температура кипіння алюмінію становить 2519 °С, а міді – 2580 °С.

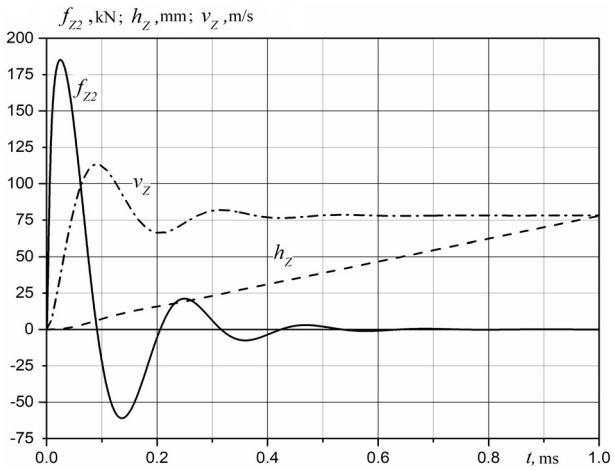
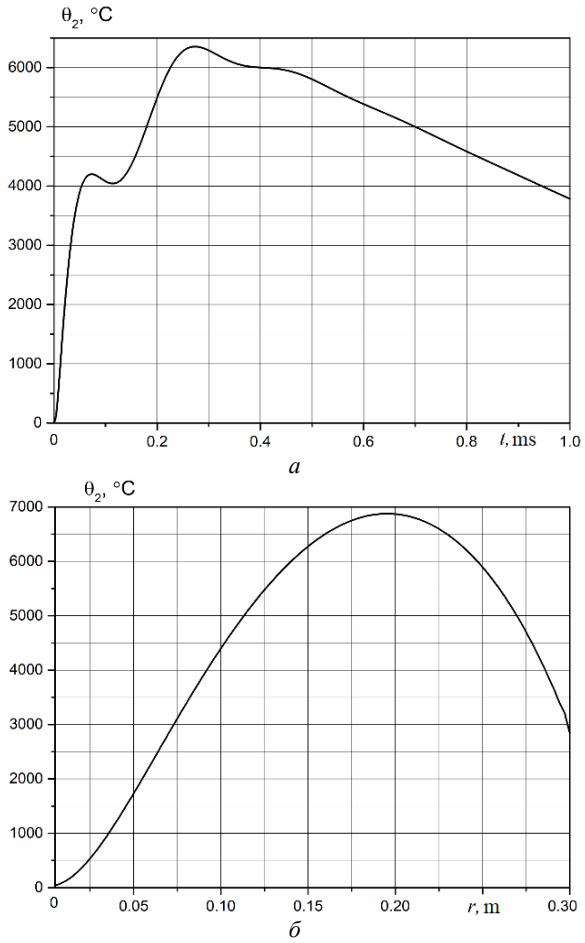


Рис. 2. Електродинамічна сила f_{z2}, швидкість v_z та переміщення h_z якоря в ІІПП



а

б

Рис. 3. Перевищення температури якоря: зміна перевищення температури у часі (*а*), радіальний розподіл перевищення температури в момент максимуму струму (*б*)

Для апробації математичної та комп'ютерної моделей виконано перевірку енергетичного балансу ІІПП. На рис. 4 представлені: W_C – енергія ЄНЕ; W_{floss} – теплові втрати в якорі; W_i – теплові втрати в індукторі; W_{mag} – енергія магнітного поля; W_{Sr} – теплові втрати на обмежувальному резисторі та підвідних проводах; W_{Sind} – магнітна енергія на підвідних проводах; W_{kin} – кінетична енергія. Оскільки баланс енергії виконується, це свідчить про достовірність отриманих результатів.

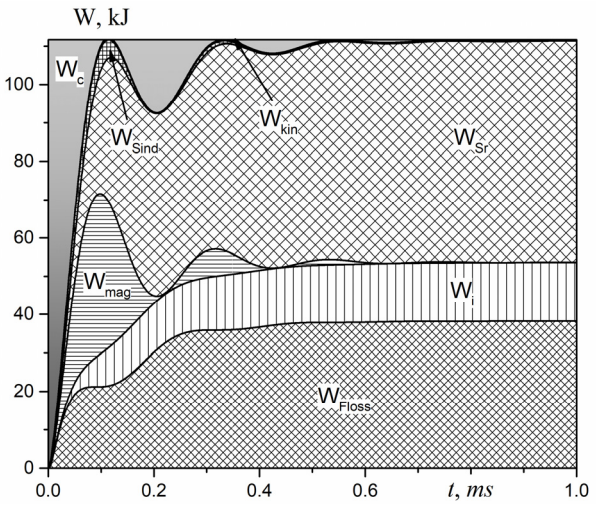


Рис. 4. Розподіл енергії в ІІПП

Під час робочого процесу магнітна енергія W_{mag} та енергія ЄНЕ W_C мають коливально-загасаючий характер, причому вони змінюються практично в протифазі. Всі інші складові енергій в прискорювачі зростають до різних рівнів, виходячи на певне стале значення. Як випливає з результатів розрахунку, основна частина енергії ЄНЕ перетворюється в теплову енергію в активних елементах і елементах кола збудження ІІПП.

Експериментальні дослідження ІІПП. Експериментальні дослідження ІІПП плазмового утворення були проведені на базі НДПКІ «Молнія» з використанням методики, представленої в [16]. Експериментальна установка включає ЄНЕ генератора струму ГІТМ-10/350, який складається з 120 паралельно з'єднаних конденсаторів ИК503У4, кожен с яких має ємність 3 мкФ. Середній вивід кожного конденсатора з'єднаний зі спільною шиною через 4 паралельно з'єднаних резистора ТВО-60 з опором 24 Ом. Комутація ЄНЕ здійснюється через високовольтний розрядник.

Параметри експериментальної установки: сумарна ємність ЄНЕ – 360 мкФ, максимальна напруга ЄНЕ – 50 кВ, виміряний активний опір індуктора – 9 мОм, сумарний опір кола збудження – 50 мОм, індуктивність індуктора – 15 мГн.

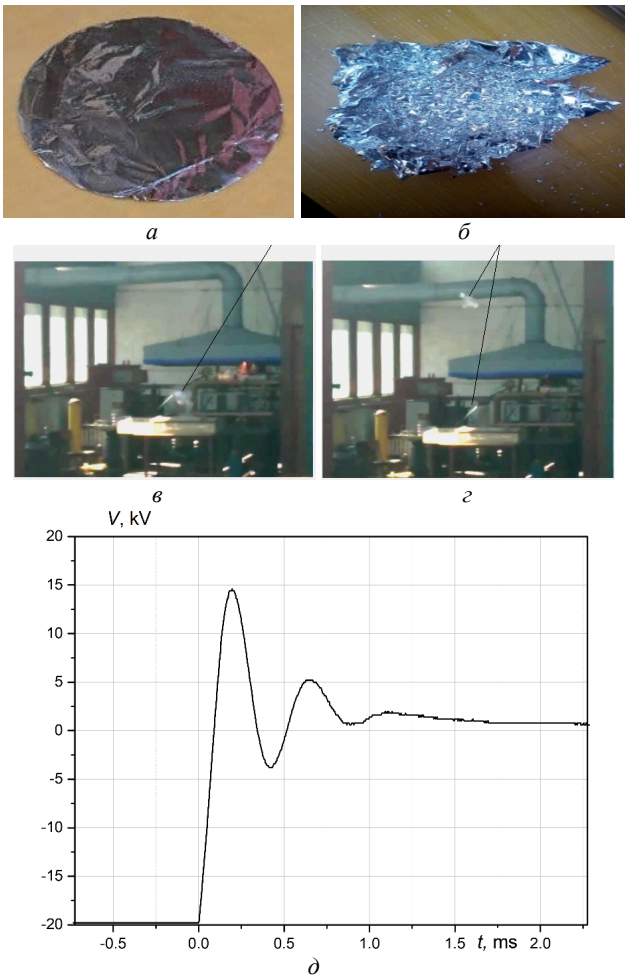
Були проведені експериментальні дослідження ІІПП з якорями різної форми та матеріалів, що виконані з електропровідникової фольги. При дослідженнях індуктор горизонтально прикріплювався до ізоляційної основи, а зверху на ньому через ізоляційну пластину встановлювався якір. Така конструкція прискорювача забезпечувала вертикальне переміщення якоря під дією електродинамічних зусиль.

Індуктор був виготовлений у вигляді плоскої дискової спіралі із сталі з зовнішнім діаметром 600 мм. Між витками спіралі виконаний зазор, який забезпечує унеможливлення міжвиткового електричного пробою. Витки спіралі прикріплені за допомогою сталевих гвинтів до ізоляційної плити (рис. 5). Поперечний перетин витка спіралі складав 5×25= 125 мм^2. В дослідах використано два варіанти індуктора. В першому варіанті (7 витків) внутрішній виток індуктора розміщувався в центрі і індуктивність індуктора L_1 = 12 мкГн. В другому варіанті два внутрішніх витків індуктора було видалено і діаметр внутрішнього отвору склав 230 мм.

а *б*

Рис. 5. Зовнішній вигляд індуктора ІІПП: перший варіант (*а*), другий варіант (*б*)

На рис. 6 показані результати роботи ІІПП, у якого якір виконаний у вигляді алюмінієвій фольги товщиною 18 мкм дискової форми з зовнішнім діаметром D_{ex} = 600 мм (рис. 6,*а*), а індуктор першого варіанту підключається до ЄНЕ з напругою U_0 = 20 кВ. Після випробувань дисковий якір являє собою стиснуту в об'ємний комок алюмінієву фольгу (рис. 6,*б*). В процесі роботи прискорювача якір переходить в плазмовий стан і переміщується вертикально вверх на декілька метрів (на рис. 6,*в*,*г* якір показаний прямою лінією).

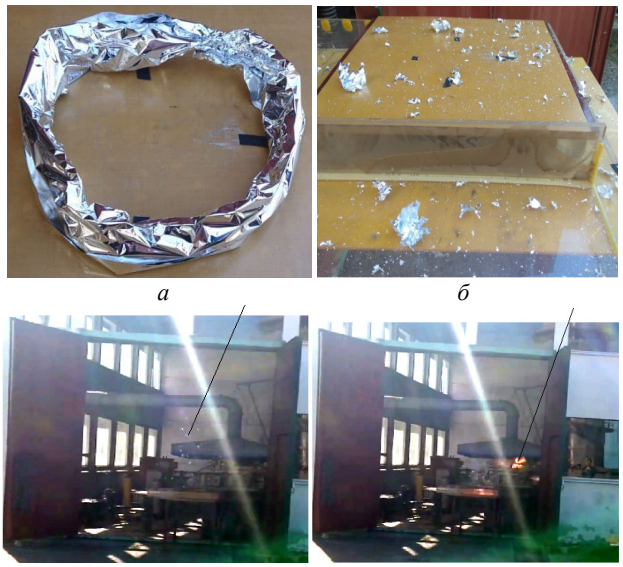


а *б* *в* *г* *д*

Рис. 6. Дисковий якір до (*а*) і після (*б*) випробувань, положення якоря на початковому (*в*) і наступному (*г*) моментах роботи і осцилограма напруги ЄНЕ (*д*) ІІПП

На рис. 7 показані результати роботи ІІПП, у якого якір виконаний у вигляді тора з алюмінієвої фольги товщиною 10 мкм, а індуктор другого варіанту підключається до ЄНЕ з напругою U_0 = 23 кВ.

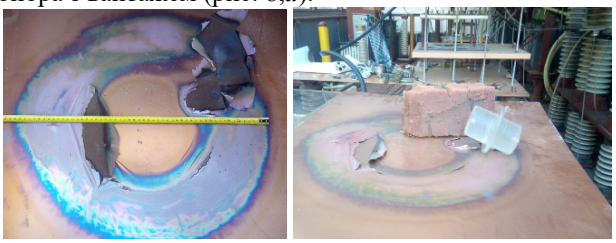
Середній діаметр тора 300 мм (рис. 7,*а*). При роботі прискорювача тороїдний якір після переходу в плазмовий стан перетворювався на скупчення маленьких частинок, які здіймались на значну висоту відносно індуктора (рис. 7,*б*). Перетворення якоря, виконаного з більш тонкої фольги, ніж в попередньому досліді, в скупчення малих частинок можна пояснити як дією електродинамічних зусиль в якорі, так і нерівномірним термічним пошкодженням окремих його ділянок.



а *б* *в* *г*

Рис. 7. Тороїдний якір до (*а*) і після (*б*) випробувань, положення якоря на початковому (*в*) і наступному (*г*) моментах роботи ІІПП

На рис. 8 показані результати роботи ІІПП, у якого індуктор другого варіанту збуджується при напрузі U_0 = 20 кВ, а якір виконаний з мідної фольги, товщиною 9 мм, яка закріплена на листу склотекстоліту з розмірами 900×900×1 мм. Оскільки лист склотекстоліту був вигнутим, то для його рівномірного притискання до індуктора була застосована ізоляційна опора з вантажем (рис. 8,*а*).

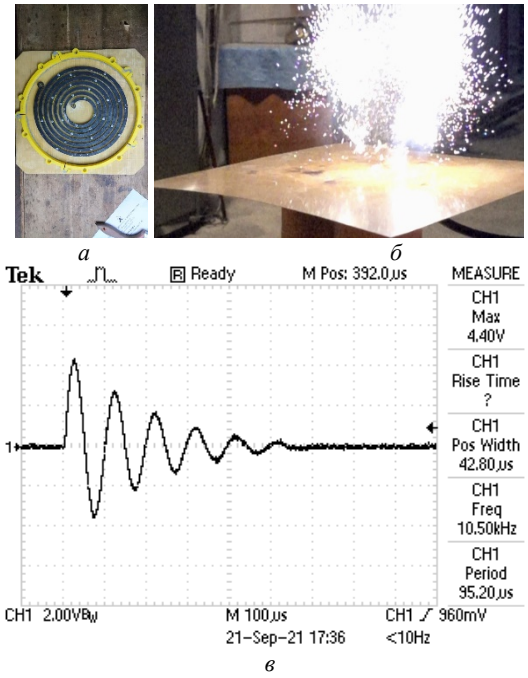


а *б*

Рис. 8. Якір з мідної фольги, яка закріплена на листу з склотекстоліту після випробувань ІІПП

Після роботи прискорювача в місті притискання склотекстолітового листа на мідній фользі виникла ділянка термічного згоряння (рис. 8,*б*), частки якої підлетіли вгору. При цьому добре видно характерний круговий контур нагрівання мідної фольги, що свідчить про аналогічний характер індукованого струму в якорі. Оскільки температура плавлення міді вища, ніж у алюмінію, то навіть в зоні протікання індукованого струму не відбулося термічної іонізації мідної фольги. На інших ділянках термічного нагрівання фольги практично відсутнє.

При використання більш компактного індуктора (зовнішній діаметр 280 мм, ширина витка 9,4 мм, відстань між витками 5 мм) на ЄНЕ з більшою напругою U_0 = 35 кВ та меншою ємністю C_0 = 18,5 мкФ (сумарний опір кола збудження R_0 = 0,1 Ом, сумарна індуктивність кола збудження L_0 = 1,5 мкГн) відбувається формування плазмового утворення, яке переміщується відносно індуктора. На рис. 9 показана осцилограма струму в індукторі, зовнішній вигляд індуктора та плазмове утворення, яке перемістилося від індуктора. Якір виконаний з мідної фольги, товщиною 9 мм, яка закріплена на листу склотекстоліту з розмірами 900×900×1 мм.



а *б* *в*

Рис. 9. Зовнішній вигляд індуктора (*а*), плазмове утворення (*б*) прискорювача та осцилограма струму індуктора (*в*)

Осцилограма струму індуктора має коливально-загасаючий характер з амплітудою першої напіхвилі 51,6 кА. На рис. 9,*б* видно, що плазмове утворення під дією електродинамічних зусиль відривається від листа мідної фольги і переміщується на декілька метрів вертикально вгору.

Таким чином, якщо напруга ЄНЕ не перевищує певних значень, то індукований струм в якорі відносно малий і в процесі нагріву не формує термічно іонізоване плазмове утворення певної частини мідної фольги. А зі збільшенням напруги ЄНЕ відбувається підвищення індукованого струму в якорі, який здійснює термічну іонізацію відповідної частин якоря з переходом у плазмове утворення, яке під дією електродинамічних сил переміщається вертикально вгору на декілька метрів.

Результати експериментальних досліджень, а саме, форма, напруга та струм в індукторі з точністю до 15 % співпадають з розрахунковими, що свідчить про достовірність математичної моделі прискорювача.

Таким чином, експериментальні та теоретичні дослідження показують справедливість концепції імпульсного індукційного прискорювача, в якому за рахунок високої густини індукованого струму в якорі, що виконаний з електропровідної фольги, відбувається термічна іонізація в результаті електричного вибу-

ху провідника з переходом його в плазмовий стан. Взаємодія цього плазмового утворення з магнітним полем індуктора призводить до появи електродинамічної сили, яка забезпечує його переміщення у відкритому атмосферному середовищі на декілька метрів відносно нерухомого індуктора.

Висновки.

1. Роботи по створенню та метанню плазмових формувань є актуальними і проводяться в провідних наукових центрах світу з використанням газодинамічних і електромагнітних зусиль.

2. Розроблена і реалізована в програмному пакеті Comsol Multiphysics математична модель імпульсного індукційного прискорювача, в якій якір не змінює своєї форми і агрегатного стану в процесі роботи. Математична модель, що враховує розподілені у просторі параметри прискорювача, використовує систему диференціальних рівнянь в часткових похідних щодо просторових і часових змінних.

3. Розраховані електромеханічні і теплові характеристики прискорювача. Показано, що перевищення температури в якорі, що виконаний у вигляді алюмінієвої фольги, суттєво нерівномірно. Максимальне значення температури має місце в середній частині фольги ближче до зовнішнього краю, причому ця температура значно перевищує температуру кипіння алюмінію.

4. Проведені експериментальні дослідження прискорювача, у якого якір виконаний з алюмінієвої та мідної фольги, а індуктор, що підключається до високовольтного ЄНЕ, виконаний зі сталі у вигляді плоскої дискової спіралі. Встановлено, що в процесі роботи прискорювача якір переходить в плазмовий стан і переміщується вертикально вверх на декілька метрів, перетворюючись в об'ємний комок або на скупчення маленьких частинок, які здіймались на значну висоту відносно індуктора.

5. Експериментально показано характерний круговий контур термічного нагрівання мідної фольги якоря, яка закріплена на листі склотекстоліту, що свідчить про аналогічний характер плазмового утворення.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Myers C.E., Belova E.V., Brown M.R., Gray T., Cothran C.D., Schaffer M.J. Three-dimensional magnetohydrodynamics simulations of counter-helicity spheromak merging in the Swarthmore Spheromak Experiment. *Physics of Plasmas*, 2011, vol. 18, no. 11, pp. 112512-112530. doi: https://doi.org/10.1063/1.3660533.

2. Gray T., Lukin V.S., Brown M.R., Cothran C.D. Three-dimensional reconnection and relaxation of merging spheromak plasmas. Physics of Plasmas, 2010, vol. 17, no. 10, pp. 102106-102114. doi: https://doi.org/10.1063/1.3492726.

3. Ji H., Daughton W. Phase diagram for magnetic reconnection in heliophysical, astrophysical, and laboratory plasmas. *Physics of Plasmas*, 2011, vol. 18, no. 11, pp. 111207-111217. doi: https://doi.org/10.1063/1.3647505.

4. Baalrud S.D., Bhattacharjee A., Huang Y.-M., Germaschewski K. Hall magnetohydrodynamic reconnection in the plasmoid unstable regime. *Physics of Plasmas*, 2011, vol. 18, no. 9, pp. 092108-092116. doi: https://doi.org/10.1063/1.3633473.

5. Sebastian Anthony. *Open-air plasma device could revolutionize energy generation, US Navy's weaponry*. Available: https://www.extremetech.com/defense/153630-open-air-plasma-device-could-revolutionize-energy-generation-us-navys-weaponry (accessed 10.05.2022).

6. Curry R.D. *Systems and Methods to Generate a Self-Confined High Density Air Plasma*. Patent US WO2012173864. 2012. Available: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2012173864. (accessed 10.01.2023).

7. Takahashi K. Helicon-type radiofrequency plasma thrusters and magnetic plasma nozzles. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2019, vol. 3, no. 1, art. no. 3. doi: https://doi.org/10.1007/s41614-019-0024-2.

8. Shumeiko A.I., Telekh V.D., Mayorova V.I. Development of a novel wave plasma propulsion module with six-directional thrust vectoring capability. *Acta Astronautica*, 2022, vol. 191, pp. 431-437. doi: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.11.028.

9. Guo J. Induction plasma synthesis of nanomaterials. *Plasma Science and Technology – Progress in Physical States and Chemical Reactions*. Rijeka, InTech, 2016. pp. 3-30. doi: https://doi.org/10.5772/62549.

10. Rudikov A.I., Antropov N.N., Popov G.A. Pulsed plasma thruster of the erosion type for a geostationary artificial Earth satellite. *Acta Astronautica*, 1995, vol. 35, no. 9–11, pp. 585-590. doi: https://doi.org/10.1016/0094-5765(95)00025-U.

11. Spanjers G., McFall K., Gulczinski III F., Spores R. Investigation of propellant inefficiencies in a pulsed plasma thruster. *32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1996. doi: https://doi.org/10.2514/6.1996-2723.

12. Takahashi K. Magnetic nozzle radiofrequency plasma thruster approaching twenty percent thruster efficiency. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1, art. no. 2768. doi: https://doi.org/10.1038/s41598-021-82471-2.

13. Di Canto G. *Plasma propulsion system and method*. Patent US WO2016151609. 2016. Available: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2016151609&_cid=P10-LL70BV-97870-1. (accessed 10.01.2023).

14. Polzin K.A., Choueiri E.Y. Performance optimization criteria for pulsed inductive plasma acceleration. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, vol. 34, no. 3, pp. 945-953. doi: https://doi.org/10.1109/TPS.2006.875732.

15. Korytchenko K.V., Bolyukh V.F., Rezinkin O.L., Burjakovskij S.G., Mesenko O.P. Axial coil accelerator of plasma ring in the atmospheric pressure air. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2019, vol. 119, no. 1, pp. 120-123.

16. Bolyukh V.F., Kocherga A.I. Efficiency and Practical Implementation of the Double Armature Linear Pulse Electromechanical Accelerator. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2021, pp. 153-158. doi: https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570065.

17. Bolyukh V.F., Schukin I.S. Excitation with a series of pulses of a linear pulse electrodynamic type converter operating in power and high-speed modes. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 3-11. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.01.

Надійшла (Received) 08.01.2023
Прийнята (Accepted) 15.03.2023
Опублікована (Published) 01.09.2023

Коритченко Костянтин Володимирович[1], *д.т.н., проф.,*
Болюх Володимир Федорович[1], *д.т.н., проф.,*
Буряковський Сергій Геннадійович[2], *д.т.н., проф.,*
Кашанський Юрій Володимирович[1],
Кочерга Олександр Іванович[1], *к.т.н.,*
[1] Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
e-mail: korytchenko_kv@ukr.net;
vfbolyukh@gmail.com (Corresponding Author);
yurii.kashanskyi@khpi.edu.ua; kocherga.oleksandr07@gmail.com

[2] Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»,
61013, Харків, вул. Шевченка, 47,
e-mail: sergbyr@i.ua

K.V. Korytchenko[1], *V.F. Bolyukh*[1], *S.G. Buriakovskyi*[2], *Y.V. Kashansky*[1], *O.I. Kocherga*[1]
[1] National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
[2] Research and Design Institute «Molniya»
of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

Electromechanical and thermophysical processes in the pulse induction accelerator of plasma formation.

Introduction. *Work on the creation and throwing of plasma formations is carried out in the world's leading scientific centers in various ways. The creation of a plasma formation with duration of several milliseconds and its acceleration in an open atmospheric environment to a distance of 0.5-0.6 m was achieved. To create plasma, the energy of the primary discharge circuit is used, followed by the acceleration of the gas-plasma formation with the help of the energy of the secondary circuit. Plasma formation is also obtained due to the electric explosion of a conductor in a rapidly decreasing strong magnetic field, etc. The* ***purpose*** *of the article is a theoretical and experimental study of electromechanical and thermophysical processes in a pulse induction accelerator, which ensures the creation of plasma formation due to thermal ionization as a result of the electric explosion of the conductor and its throwing in the atmospheric environment relative to the inductor.* ***Method.*** *For the analysis of electromechanical and thermophysical processes in the pulse induction accelerator of plasma formation (PIAPF), a mathematical model of the accelerator was developed and implemented in the Comsol Multiphysics software package, in which the armature does not change its shape and aggregate state during operation and takes into account the parameters of the accelerator distributed in space.* ***Results.*** *Calculated electromechanical and thermal characteristics of the accelerator. It is shown that the temperature rise in the aluminum foil armature is significantly nonuniform. The maximum temperature value occurs in the middle part of the foil closer to the outer edge, and this temperature is significantly higher than the boiling point of aluminum.* ***Scientific novelty.*** *Experimental studies of the PIAPF were carried out, in which the armature is made of aluminum and copper foil, and the inductor connected to the high-voltage capacitive energy storage device is made in the form of a flat disk spiral. It was established that during the operation of the PIAPF, the armature goes into a plasma state and moves vertically upwards, turning into a volumetric wad or a pile of small particles that rose to a considerable height relative to the inductor. Experimentally, the characteristic circular circuit of thermal heating of the copper foil of the armature, which is fixed on a glass-textolite sheet, is shown, which indicates a similar nature of plasma formation.* ***Practical value****. The results of experimental studies with an accuracy of up to 15 % coincide with the calculated ones and show the validity of the PIAPF concept, in which, due to the high density of the induced current in the armature, thermal ionization occurs as a result of an electric explosion of the conductor with its transition to the plasma state. And the interaction of the plasma formation with the magnetic field of the inductor leads to the appearance of an electrodynamic force that ensures its movement in the open atmospheric environment.* References 17, figures 9.

Key words: **pulse induction accelerator of plasma formation, mathematical model, electromechanical and thermal processes, experimental studies.**

How to cite this article:
Korytchenko K.V., Bolyukh V.F., Buriakovskyi S.G., Kashansky Y.V., Kocherga O.I. Electromechanical and thermophysical processes in the pulse induction accelerator of plasma formation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 5, pp. 69-76. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.10