

УДК 537.567

О.В. Сакун, В.Ф. Болюх, О.П. Месенко, К.В. Коритченко

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ІНДУКУВАННЯ "СТІЙКОГО" ПЛАЗМОВОГО КІЛЬЦЯ У ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ

Здійснено числові дослідження умов індукції "стійкого" плазмового кільця у електродинамічному прискорювачі. Визначено вплив опору струмопровідного кільця на його перехід до "стійкого" стану. Виявлено залежність коефіцієнта перетворення електричної енергії у енергію магнітного поля від кількості витків індуктора та початкової швидкості руху кільця. Обґрунтовано умови технічної реалізації електродинамічного прискорювача, за яких можливе утворення "стійкого" плазмового кільця. Бібл. 8, рис. 9.

Ключові слова: кульова блискавка, електродинамічний прискорювач, плазмове кільце.

Проведены численные исследования условий индукции "устойчивого" плазменного кольца в электродинамическом ускорителе. Определено влияние сопротивления токопроводящего кольца на его переход в "устойчивое" состояние. Выявлена зависимость коэффициента преобразования электрической энергии в энергию магнитного поля от количества витков индуктора и начальной скорости движения кольца. Обоснованы условия технической реализации электродинамического ускорителя, при которых возможно образование "устойчивого" плазменного кольца. Библ. 8, рис. 9.

Ключевые слова: шаровая молния, электродинамический ускоритель, плазменное кольцо.

Вступ. Кульова блискавка як природне явище, що являє собою плазмове утворення, викликає значний науковий інтерес. При штучному утворенні просторового плазмового згустку з'являються можливості керування ним, зокрема прискорення в певному напрямку, що відкриває великі можливості в розвитку новітніх технологій.

Потенційно дослідження кульової блискавки може призвести до відкриття нового способу накопичення електромагнітної енергії, вирішення питання генерування "стійкої" плазми для ряду практичних задач. Тому науково-прикладна задача дослідження умов генерування "стійких" плазмових формувань та керування ними є актуальною.

Існує декілька гіпотез утворення кульової блискавки, які представлені математичними моделями [1-4]. Але відсутність кульових блискавок, що штучно створені у лабораторних умовах, не дозволяє надати перевагу тим, чи іншим моделям.

Відома гіпотеза устрою блискавки з фізико-математичним обґрунтуванням стійкості такого плазмового утворення [1-3], за якою кульова блискавка являє собою форму організованого руху електронів та іонів. При цьому, рух електронів відбувається у електронній оболонці, а позитивні іони зосереджені у ядрі блискавки. Перевірка даної гіпотези може бути здійснена шляхом індукції струму у газорозрядній плазмі за допомогою електродинамічного прискорювача.

Спробу здійснити таке індукції на дослідній установці зроблено в роботі [4]. Для цього здійснювалось накопичування електромагнітної енергії, після чого відбувався розряд потужного імпульсу струму в просторі, обмеженому об'ємним витком. Цей простір попередньо заповнювався гарячим повітрям та спектрально розчленованим світлом. При розряді утворювалась кульова блискавка у вигляді тороїдальної сфери. Але за результатами досліджень формування "стійкого" плазмового утворення не відбулося. Це може бути пов'язано з неузгодженням процесу прискорення. Тому дана робота направлена на обґрунтування умов індукції "стійкого" плазмового кільця у електродинамічному прискорювачі.

В роботі [5] описано спосіб електродинамічного прискорення газоплазмового середовища. Для цього використовується детонаційна труба, яка заповнюється детонаційно-спроможною газовою сумішшю. В трубі відбувається переміщення ударної хвилі до секції прискорення. Потім відбувається розряд ємнісного накопичувача на електричне коло, утворене обмоткою електромагніта і розрядними електродми. При пробиванні міжелектродного проміжку в електричному колі протікає струм. У потоці газу в секції прискорення формується область з підвищеною провідністю у вигляді замкнутого контуру, на який діє магнітне поле обмотки електромагніта і відбувається прискорення ударної хвилі в газоплазмовому середовищі.

Але для реалізації зазначеного способу необхідна спеціальна детонаційно-спроможна газова суміш.

Моделювання процесу електродинамічного прискорення струмопровідного плазмового кільця. Умови індукції "стійкого" плазмового кільця у електродинамічному прискорювачі визначено з наступних міркувань. Згідно з моделями [1-4], стійкість плазмового кільця забезпечується компенсуванням відцентрових сил, що виникають під час колективного руху електронів навколо шару іонів по колу, силами електричного поля. Колективний рух електронів у заданому напрямку характеризується електричним струмом. Струмопровідне кільце має власну індуктивність L . Відповідно, під час протікання струму i у струмопровідному плазмовому кільці відбувається накопичення енергії магнітного поля $0,5Li^2$. Таким чином, наявність енергії магнітного поля у струмопровідному кільці є першою умовою утворення "стійкого" просторового плазмового згустку.

Під час електродинамічного прискорення струмопровідного кільця в електродинамічному прискорювачі відбуваються процеси перетворення енергії імпульсного джерела, наприклад, ємнісного накопичувача енергії в магнітну, електричну, кінетичну та безповоротну – у теплову. Припинення процесу перерозподілу енергії між індуктором електродинамічного прискорювача та струмопровідним плазмовим кіль-

© О.В. Сакун, В.Ф. Болюх, О.П. Месенко, К.В. Коритченко

цем відбувається після зникнення електромагнітної взаємодії. При цьому, у струмопровідному кільці надалі продовжується лише процес перетворення накопиченої енергії магнітного поля у теплову енергію. Звідси, другою умовою утворення "стійкого" плазмового кільця є зникнення зовнішніх електромагнітних сил, що діють на струмопровідне кільце, після накопичення у ньому енергії магнітного поля.

Час "стійкості" утвореного плазмового кільця обмежується тривалістю процесу перетворення енергії магнітного поля у теплову енергію. Умови наявності рівноваги між відцентровими силами, що виникають під час колективного руху електронів по колу кільця, та силами електричного поля виходять за рамки задачі, що розглядається.

З урахуванням приведених вище обмежень, умови індукування "стійкого" плазмового кільця можливо визначити за математичною моделлю електродинамічного прискорення струмопровідного кільця у індукційному прискорювачі, що описана в роботах [6-8]. Область застосування моделі обмежується коаксіальною схемою розміщення індуктора електродинамічного прискорювача та струмопровідного кільця.

Перехідні електричні процеси у електродинамічному прискорювачі розраховувались за рівняннями:

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + C^{-1} \int i_1 dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + V(t) i_2 \frac{dM_{12}}{dz}(z) = U_0; \quad (1)$$

$$R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21}(z) \frac{di_1}{dt} + V(t) i_2 \frac{dM_{12}}{dz}(z) = 0, \quad (2)$$

де індекс "1" відповідає контуру індуктора, індекс "2" – контуру струмопровідного кільця; R , L , C – активний опір, індуктивність та ємність, відповідно, $M_{12}(z) = M_{21}(z)$ – взаємна індуктивність між індуктором та струмопровідним кільцем; $i(t)$ – струм; $V(t)$ – швидкість руху струмопровідного кільця.

Електродинамічна сила між індуктором та струмопровідним кільцем визначається рівнянням:

$$f(t, z) = i_1(t) \cdot i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}. \quad (3)$$

Швидкість руху струмопровідного кільця визначалась рівнянням:

$$V = m_{\text{кіль}}^{-1} \int f(t, z) dt, \quad (4)$$

де $m_{\text{кіль}}$ – маса струмопровідного кільця.

Параметри електродинамічного прискорювача визначались виходячи зі схеми експерименту, що планується. Моделювання здійснено за розмірами індуктора: зовнішній діаметр – 8 см, внутрішній діаметр – 4 см, аксіальна висота – 0,6 см; струмопровідного кільця: зовнішній діаметр – 8 см, внутрішній діаметр – 6 см, аксіальна висота – 1 см. Розрахункова індуктивність струмопровідного кільця склала $L_{\text{кіль}} = 94,6$ нГн. Початкова відстань між геометричними центрами симетрії індуктора та кільця дорівнювала 1 см. Ємність накопичувача енергії $C = 16,2$ мкФ, напруга заряджання $U_0 = 20$ кВ. Відповідно, повна енергія розряду $Q = 3,24$ кДж.

Припустимо, що струмопровідне кільце утворюється з газорозрядної плазми, яка має провідність $100 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. За вище наведеними геометричними

розмірами струмопровідного кільця його опір дорівнює $R_{\text{кіль}} = 0,22$ Ом. Густина повітря, з якого створюється плазмове кільце, не перевищуватиме $1,29 \text{ кг/м}^3$. В розрахунковому варіанті маса кільця не перевищує $m_{\text{кіль}} = 28$ мг. Під час прискорення кільця виникає сила аеродинамічного опору. Урахування сили опору здійснено шляхом збільшення сили інерції через підвищення маси кільця.

Як параметри, що варіювалися в задачі, розглядалися кількість витків індуктора $w_{\text{інд}}$, що впливає на його активний опір $R_{\text{інд}}$ та індуктивність $L_{\text{інд}}$. Також, змінювалась початкова швидкість V_0 кільця.

В результаті розрахунку визначались: струм у контурах індуктора та кільця, залежності сили прискорення та швидкості руху кільця від часу прискорення. Також визначались кінетична енергія $Q_{\text{кін}}$, яку отримує струмопровідне кільце у результаті електродинамічного прискорення, та енергія $Q_{\text{маг}}$ магнітного поля, що накопичується у кільці після суттєвого послаблення сили електромагнітної взаємодії:

$$Q_{\text{маг}} = L_{\text{кіль}} \frac{I_{\infty}^2}{2}, \quad (4)$$

де I_{∞} – струм у кільці після суттєвого послаблення сили електромагнітної взаємодії. Енергія $Q_{\text{маг}}$ визначалась, коли сила f електродинамічного прискорення ставала меншою ніж $|f| < 1$ Н.

На рис. 1 показана схема електродинамічного прискорювача, де r – радіус плазмового кільця.

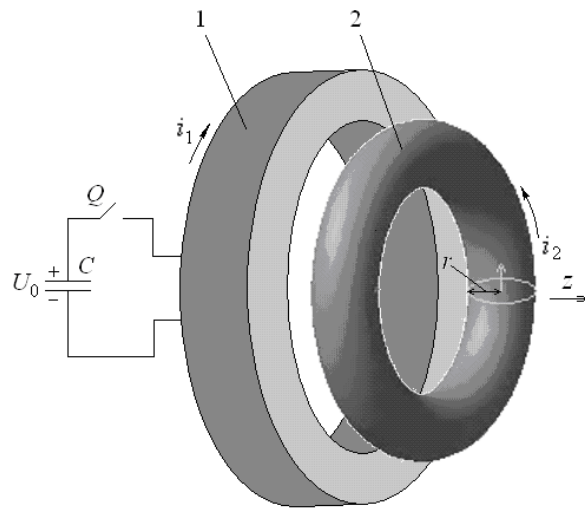


Рис. 1. Схема електродинамічного прискорювача: 1 – індуктор; 2 – струмопровідне плазмове кільце

Чисельні дослідження із застосуванням методу перебору показали, що у разі, коли опір струмопровідного кільця визначається провідністю газорозрядною плазми ($\sigma = 10 - 200 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$), накопичення енергії магнітного поля у кільці практично не відбувається. У варіанті електродинамічного прискорювача з $w_{\text{інд}} = 1$, $V_0 = 0$ м/с, $m_{\text{кіль}} = 28$ мг отримуємо розрахункові параметри $R_{\text{інд}} = 1$ мОм, $L_{\text{інд}} = 77$ нГн, та $R_{\text{кіль}} = 0,22$ Ом та електроmechanічні характеристики, що представлені на рис. 2 – 4).

З аналізу електродинамічної сили (рис. 3) маємо, що зниження сили нижче $|f| < 1$ Н відбувається, коли час розрахунку перевищує $t > 80$ мкс. При $t > 80$ мкс відбувається накопичення кінетичної енергії у кільці,

що відображається у наявності його швидкості (рис. 4), але накопичення енергії магнітного поля практично не відбулося, що відображається у практично повному зникненні струму у кільці (рис. 2).

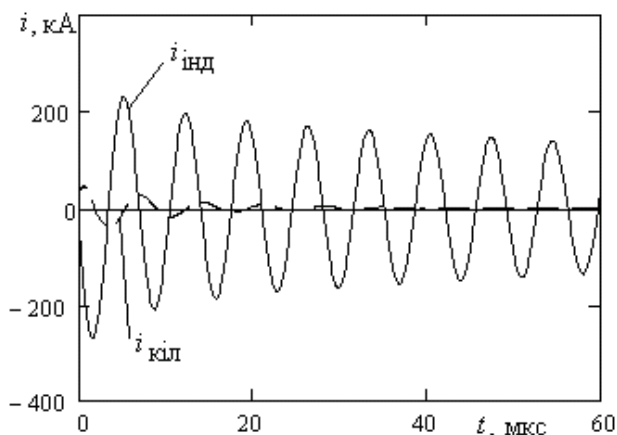


Рис. 2. Струми у колах індуктора $i_{\text{інд}}$ та струмопровідного кільця $i_{\text{кіль}}$ у розрахунковому варіанті прискорювача

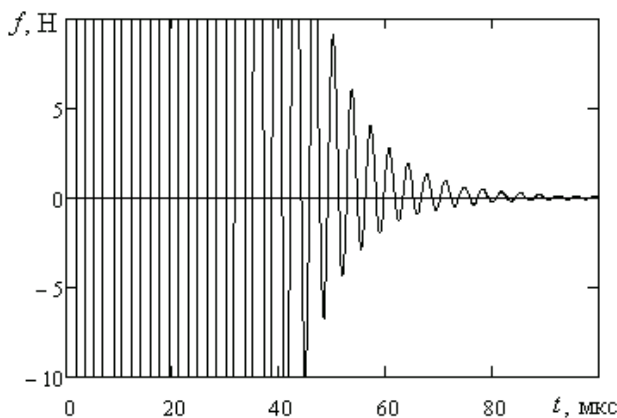


Рис. 3. Електродинамічна сила f прискорювача

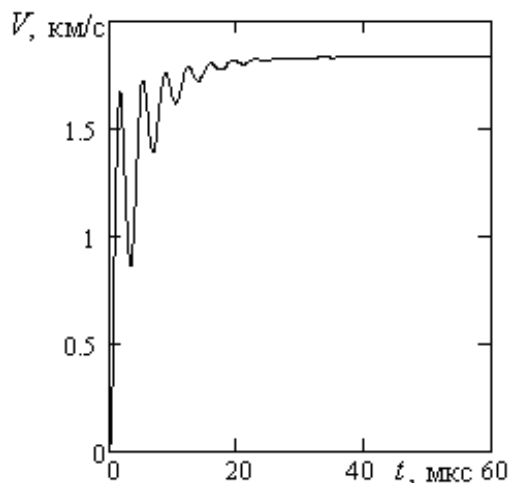


Рис. 4. Швидкість V струмопровідного кільця прискорювача

Згідно з роботою [1], у кульовій блискавці плазма переходить у надпровідний стан, тобто її активний опір відсутній. Тому проведені дослідження накопичення енергії магнітного поля у струмопровідного кільця при зменшенні його опору. За вищезазначеними параметрами, що приймалися у розрахунковому варіанті, окрім $R_{\text{кіль}}$, отримано залежність енергії магнітного поля $Q_{\text{маг}}$, що накопичується у кільці, від опору струмопровідного кільця (рис. 5).

Як витікає з розрахунків, енергія магнітного поля $Q_{\text{маг}}$, що накопичується у плазмовому кільці, збільшується при зменшенні його опору, особливо суттєво в діапазоні $R_{\text{кіль}} = 10^{-5} - 10^{-3}$ Ом. А при $R_{\text{кіль}} > 10^{-2}$ Ом зазначена енергія практично відсутня.

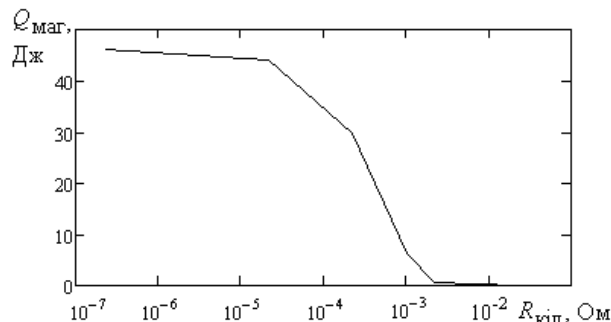


Рис. 5. Залежність енергії $Q_{\text{маг}}$ від опору струмопровідного кільця у розрахунковому варіанті

Виникнення "стійкого" плазмового кільця у розрахунковому варіанті підтверджується наявністю струму $i_{\text{кіль}}$ після послаблення електродинамічної сили (рис. 6).

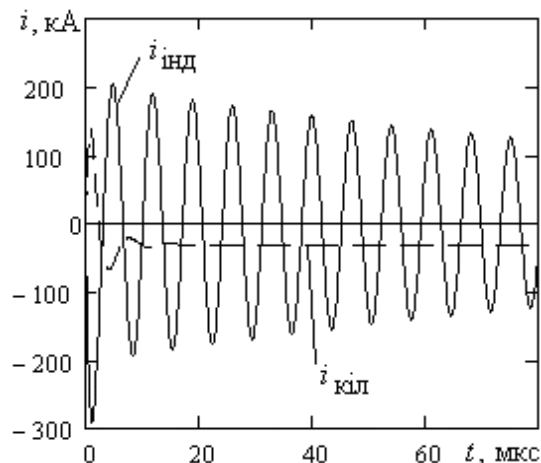


Рис. 6. Зміна струму у колах індуктора та кільця при $R_{\text{кіль}} = 22$ мкОм

За результатами розрахунку маємо, що зростання енергії магнітного поля у струмопровідному кільці відбувається за умови збільшення провідності плазми не менше, ніж на три порядки. Таким чином, електродинамічний прискорювач, що забезпечить прискорення та формування "стійкого" плазмового кільця, дозволить перевірити гіпотези щодо іон-електронної моделі кульової блискавки.

Слід зазначити, що виникають значні труднощі у практичному досягненні значень індуктивності та опору у колі індуктора, що визначені у розрахунковому варіанті ($R_{\text{інд}} = 1$ мОм, $L_{\text{інд}} = 77$ нГн). Такі обмеження викликані власною індуктивністю та опором ємнісного накопичувача енергії, наявністю індуктивності та опору у електричних дротах, що утворюють електричне коло індуктора.

Крім того, у задачі формування "стійкого" плазмового кільця ефективність електродинамічного прискорювача доцільно визначати не коефіцієнтом перетворення електричної енергії у кінетичну енергію, а коефіцієнтом перетворення електричної енергії у ене-

рگیю магнітного поля. Зокрема, у розрахунковому варіанті у енергію магнітного поля перетворено лише $Q_{\text{маг}} = 44$ Дж, що відповідає $\eta_{\text{маг}} = 1,3$ %, а у кінетичну енергію $Q_{\text{кін}} = 1044$ Дж, що відповідає $\eta_{\text{кін}} = 44,2$ %.

Вирішення зазначеної проблеми досягається шляхом збільшення кількості витків індуктора. Числове дослідження залежності коефіцієнта $\eta_{\text{маг}}$ перетворення електричної в магнітну енергію від кількості витків індуктора наведено за розрахунковими параметрами прискорювача: $R_{\text{інд}} = 1$ мОм, $V_0 = 0$ м/с, $m_{\text{кіль}} = 28$ мг, $R_{\text{кіль}} = 22$ мкОм (рис. 7).

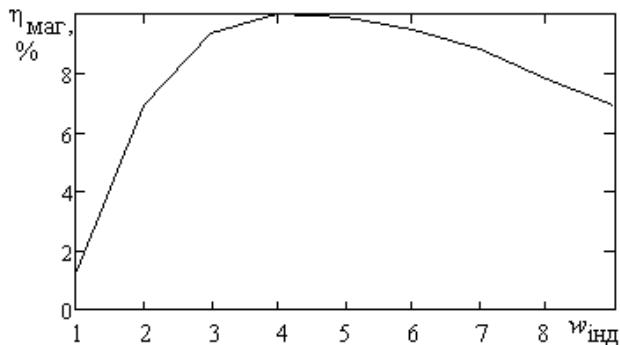


Рис. 7. Залежність коефіцієнта перетворення електричної енергії у енергію магнітного поля від кількості витків індуктора

З аналізу результатів (рис. 7) маємо, що у розрахункових варіантах коефіцієнт перетворення електричної в магнітну енергію $\eta_{\text{маг}}$ набуває максимуму при кількості витків індуктора $w_{\text{інд}} = 4$, що відповідає індуктивності $L_{\text{інд}} = 1,2$ мкГн. За такої індуктивності індуктора забезпечується можливість технічної реалізації такого електродинамічного прискорювача. Слід також відзначити зниження струму у колі індуктора по відношенню до струму у струмопровідному кільці (рис. 8), що також сприяє індукванню "стійкого" плазмового кільця у електродинамічному прискорювачі.

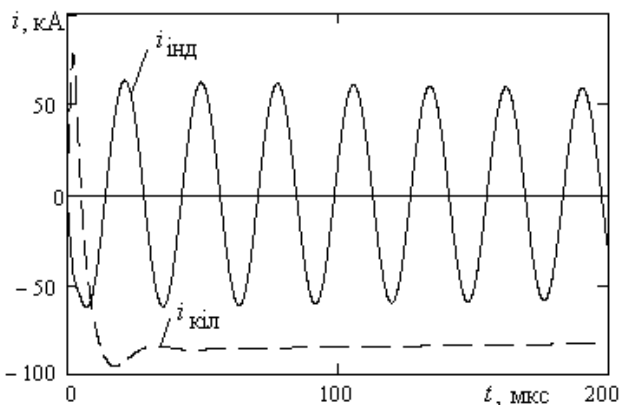


Рис. 8. Струм у колах індуктора $i_{\text{інд}}$ та струмопровідного кільця $i_{\text{кіль}}$ при $w_{\text{інд}} = 4$

При зростанні активного опору у колі індуктора $R_{\text{інд}}$ з 1 мОм до 10 мОм відбувається несуттєве зниження енергії магнітного поля $Q_{\text{маг}}$ з 309 Дж до 298 Дж. Подальше зростання опору кола індуктора до $R_{\text{інд}} = 100$ мОм призводить до прискореного зниження енергії магнітного поля $Q_{\text{маг}}$ до 228 Дж.

На ефективність перетворення електричної енергії у енергію магнітного поля значний вплив має

аеродинамічний опір навколишнього середовища. Так, у разі зростання сили інерції (збільшення маси кільця з $m_{\text{кіль}} = 28$ мг до $m_{\text{кіль}} = 280$ мг) відбувається зниження енергії з $Q_{\text{маг}} = 228$ Дж до $Q_{\text{маг}} = 99$ Дж.

Вплив аеродинамічного опору може бути компенсований приданням початкової швидкості струмопровідному кільцю (рис. 9). Результати розрахунків наведено за параметрами електродинамічного прискорювача: $w_{\text{інд}} = 4$, $m_{\text{кіль}} = 280$ мг, що відповідає розрахунковим параметрам $R_{\text{інд}} = 10$ мОм, $L_{\text{інд}} = 1,2$ мкГн та $R_{\text{кіль}} = 22$ мкОм.

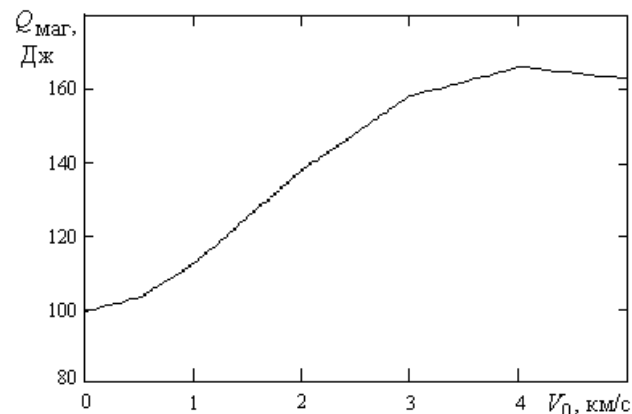


Рис. 9. Залежність енергії $Q_{\text{маг}}$ від початкової швидкості руху V_0 струмопровідного кільця

Таким чином, при збільшенні початкової швидкості струмопровідного плазмового кільця збільшується енергія магнітного поля, що в ньому накопичується. Найбільше збільшення магнітної енергії відбувається при початковій швидкості плазмового кільця близько 4 км/с для електродинамічного прискорювача з розрахунковими параметрами.

Висновки.

В результаті числових досліджень умов індукванню "стійкого" плазмового кільця у електродинамічному прискорювачі визначено, що формування "стійкого" плазмового кільця можливе лише у разі переходу плазми у надпровідний стан.

Збільшення коефіцієнта перетворення електричної енергії у енергію магнітного поля та створення умов для технічної реалізації такого перетворення досягається доведенням до оптимальних величин кількості витків індуктора та наданням початкової швидкості руху кільцю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зеликин М.И. Сверхпроводимость плазмы и шаровая молния // Современная математика. Фундаментальные направления. – 2006. – Т. 19. – С. 45-69.
2. Федосин С.Г., Ким А.С. Шаровая молния: электронно-ионная модель // Наука и техника. – 2000. – №1. – С. 1-5.
3. Федосин С.Г., Ким А.С. Физическая теория шаровой молнии // Прикладная физика. – 2001. – №1. – С. 69-87.
4. Патент РФ, МПК Н 05 Н 1/00, G 09 В 23/18. Способ получения шаровой молнии / Ким А.С., Федосин С.Г. – № 2210195; Заявл. 09.04.2001; Опубл. 10.08.2003. – Бюл. № 22. – 6 с.
5. Пат. Україна. МПК Н 05 Н 1/02, F 02 К 99/00, Н 05 Н 11/00. Спосіб електродинамічного прискорення газоплазмового середовища і пристрій для його здійснення / Болюх

В.Ф., Довбня А.М., Стаховський О.В., Косою О.І., Коритченко К.В. – № 9123012; Заявл. 12.07.2011; Опубл. 10.10.2012. Бюл. №7. – 5 с.

6. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Х.: НТУ "ХПІ", 2006. – 258 с.

7. Болюх В.Ф., Кочерга А.Г., Корытченко К.В. Эффективность дополнительного ускорения движущихся массивных объектов электромеханическим индукционным преобразователем // Интегровані технології та енергозбереження. – 2011. – №1. – С. 87-94.

8. Болюх В.Ф., Корытченко К.В., Кочерга А.Г. Индукционно-динамическое ускорение массивных объектов, обладающих начальной скоростью // Электротехника і електро-механіка. – 2010. – №6. – С. 8-12.

REFERENCES

1. Zelikin M.I. Superconductivity of plasma and fireball. *Sovremennaja matematika. Fundamental'nye napravlenija – Journal of Mathematical Sciences*, 2006, Vol.19, pp. 45-69. (Rus).

2. Fedosin S.G., Kim A.S. Fireball: electron-ion model. *Nauka i tehnika – Science & Technology*, 2000, no.1, pp. 1-5. (Rus).

3. Fedosin S.G., Kim A.S. Physical theory of fireball. *Prikladnaja fizika – Applied physics*, 2001, no.1, pp. 69-87. (Rus).

4. Kim A.S., Fedosin S.G. *Sposob poluchenija sharovoj molnii* [Method for formation of the fireball]. Patent RU, no.2210195, 2003.

5. Bolyukh V.F., Dovbnya A.M., Stakhovsky O.V., Kosoy A.I., Korytchenko K.V. *Sposib elektrodinamichnogo pryskorennja gazoplazmovogo seredovyshha i prystrij dlja jogo zdijsnennja* [Method of an electrodynamic acceleration of gas-plasma environment and a device for its implementation]. Patent UA, no.91230, 2010.

6. Bolyukh V.F. Dan'ko V.G. *Linijni elektromehanichni peretvorjuvachi impul'snoi' dii'* [Linear electromechanical pulsed accelerators]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2006, p. 258. (Ukr).

7. Bolyukh V.F., Kocherga A.G., Korytchenko K.V. Efficiency of additional acceleration of heave moving objects by electro-mechanical induction accelerator. *Integrovani tehnologii' ta energozberezhennja – Integrated technology and energy efficiency*, 2011, no.1, pp. 87-94. (Rus).

8. Bolyukh V.F., Korytchenko K.V., Kocherga A.G. Induction-dynamic acceleration of massive objects with initial velocity. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.6, pp. 8-12. (Rus).

Надійшла (received) 30.10.2014

Сакун Олександр Валерійович¹, к.б.н., с.н.с.,
Болюх Володимир Федорович¹, д.т.н., проф.,
Месенко Олександр Петрович²,
Коритченко Костянтин Володимирович¹, д.т.н., с.н.с.

¹ Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076816, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua,

² Управління державної охорони України,
01024, Київ, вул. Богомольця, 8,
тел/phone +38 044 2536659, e-mail: info@do.gov.ua

O.V. Sakun¹, V.F. Bolyukh¹, O.P. Mesenko², K.V. Korytchenko¹

¹ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

² State Guard Department of Ukraine,
8, Bohomoltsia Str., Kyiv, 01024, Ukraine.

Conditions investigations of induction of the "steady" plasma ring in the electrodynamic accelerator.

The numerical investigation of conditions of the "steady" plasma ring induction in the electrodynamic accelerator was made. The influence of a ring resistance on transition of the ring to "steady" state was determined. The dependence of the coefficient of electrical energy conversion into magnetic field energy on the number of inductor turns and the initial velocity of the ring was found out. The technical requirements to the electrodynamic accelerator by which possible the formation of "steady" plasma ring was obtained. References 8, figures 9.

Key words: fireball, electrodynamic accelerator, plasma ring.