

УДК 621.313

Алгоритм работы программного пакета MAXWELL 3D, применяемого для численного анализа магнитного поля в двигателе с катящимся ротором/ А. А. Дунев// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. - № 11 (985). – С. 161-167. – Бібліогр.: 5назв.

Проведено аналіз алгоритму роботи статичного модулю програмного пакету Maxwell 3D, що дозволяє вирішувати завдання візуалізації магнітних полів в тривимірних електромеханічних об'єктах, стосовно двигуна з ротором, що котиться.

Ключові слова: двигун з ротором, що котиться, система рівнянь Максвелла, сіточна структура, магнітостатичний вирішувач, граничні умови.

The analysis of the algorithm of the static module software package Maxwell 3D, which allows to solve problems of visualization of magnetic fields in three-dimensional electromechanical objects in relation to the engine with rolling rotor.

Keywords: motor with the rolling rotor, system of the Maxwell equations, grid structure, magnetostatic solver, boundary conditions.

УДК 537.84

А. Ю. ПЕДЧЕНКО, магістр, НТУУ «КПІ», Київ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ У ВИСОКОЧАСТОТНОМУ ІНДУКЦІЙНОМУ ПЛАЗМОТРОНІ

Розроблено математичну модель магнітогідродинамічного та теплового стану ВЧІ-плазмотрона для моделювання процесу сфероїдизації кварцових гранул. Досліджено вплив зміни частоти та сили струму, витрат плазмоутворюючого газу на поля індукованого поля у плазмі, на розподіл полів температури та швидкості в ВЧІ-плазмотроні без та при врахуванні радіаційної складової теплообміну.

Ключові слова: ВЧІ-плазмотрон, магнітогідродинамічний та тепловий стан, частота, густина електричного струму, температура, швидкість потоку плазми.

Постановка проблеми

Математична постановка задачі, про яку йде мова в статті, належить до фізики нерівноважної плазми.

Первинною задачею при моделюванні різноманітних високочастотних індукційних процесів, що виникають у плазмі є перш за все знаходження параметрів електромагнітного поля, які діють на робоче середовище, а саме – напруженості електричного поля або густини електричного струму, що визначають джоулеву теплоту у плазмі. А вже на базі отриманих даних можна визначити вторинні процеси та їх фізичні поля – тепло-гідродинамічний стан системи.

Аналіз досліджень і публікацій

Проблемі досліджень фізичних процесів, що виникають у ВЧІ-плазмотронах, присвячена велика кількість експериментальних робіт, а теоретичним дослідженням – обмежена кількість наукових робіт. При цьому отримання достовірних експериментальних даних стримується надвисокими температурами плазми (понад 3000 °С), агресивністю середовища, чутливістю газового розряду до оточуючих тіл та ін. В той час як теоретичні методи дослідження не стримується екстремальними властивостями високотемпературної плазми і, тому за допомогою обчислювального експерименту можуть дати вагомий результат в дослідженнях нерівноважної плазми.

Вивченню властивостей безелектродних високочастотних розрядів присвячена робота Штрауса [1]. Автор якої досліджує вплив різних газів на запалення

© А. Ю. ПЕДЧЕНКО, 2013

безелектродного розряду. В якості експериментаних газів використані інертні гази (He, Ar, Ne, Kr, Xe), молекулярні гази N_2 та O_2 і пара ртуті та йоду. В роботі досліджено залежність потенціалу запалення безелектродного розряду від тиску газу в розрядній камері плазмотрона.

В роботі Кабанна [2] приводяться фізичні дослідження, де автор використав комплексну змінну провідності, електронну температуру та інтегральне випромінювання безелектродного індукційного розряду в інертних газах. Для визначення провідності розряду була прийнята модель, відповідно до якої розряд розглядався як суцільний циліндр, який нагрівався в індукторі з постійною провідністю.

У роботі [3] представлено результати числового аналізу різних конструкцій ВЧІ-плазмотронів та умов їх експлуатації, зокрема, досліджено різні конфігурації індуктора: спіральна, плоска, еліптична та двоступенева. Отримані результати числових експериментів показали, що просторові ефекти, які виникають у ВЧІ-плазмотронах, залежать головним чином від форми соленоїда та відіграють важливу роль при фізичному описанні газорозрядних процесів.

В статті [4] сформульована математична модель процесу сфероїдизації частинок кварцу в ВЧІ-плазмотроні на основі системи рівнянь Ейлера і Максвелла з урахуванням $k-\varepsilon$ турбулентності. За допомогою розробленої числової моделі для розрахунків фізичних полів процесу сфероїдизації частинок кварцу в ВЧІ-плазмотроні визначено режимні параметри експлуатації, при яких теоретичні питомі витрати електроенергії (без урахування втрат у перетворювачі й індукторі) менше за 3000 кВт·год./т. Визначено, що рівень температур, який досягається в плазмотроні, є достатнім для часткового плавлення і випаровування кварцових гранул, тому що $T_{\max} = 8250 \text{ K} > T_{\text{boil}} = 2503 \text{ K}$.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка числової моделі магнітогідродинамічного та теплового стану ВЧІ-плазмотрона та дослідження за її допомогою параметрів індукованого струму та тепло-гідродинамічних характеристик плазми при зміні електричних параметрів індуктора та витрат плазмоутворюючого газу.

Фізична та математична моделі магнітогідродинамічного та теплового стану ВЧІ-плазмотрона

Конструкція атмосферного повітряного ВЧІ-плазмотрона представлена на рис. 1 і складається з кварцової трубки 2, в яку з нормальною швидкістю V подається плазмоутворюючий газ – повітря. Навколо трубки розташовано спіральний індуктор 3, по якому тече змінний струм з силою струму I та частотою ω . Вся конструкція плазмотрона при цьому знаходиться у середовищі повітря 4.

Припущення фізичної моделі ВЧІ-плазмотрона:

- потік плазмоутворюючого газу, кварцових гранул та плазми є однофазним, стаціонарним, постійним та ламінарним;
- середовище плазми є рідиною, що стискається;
- фізичні властивості середовищ залежать від температури;

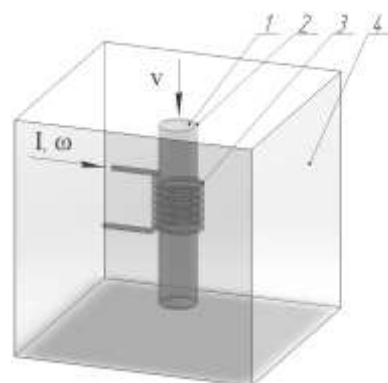


Рис. 1 - Модель ВЧІ-плазмотрона: 1 – плазмоутворюючий газ; 2 – кварцова трубка; 3 – ВЧІ-індуктор; 4 – оточуюче середовище (повітря)

- плазма вважається прозорим теплопровідним середовищем та знаходиться в локальній термодинамічній рівновазі;
- внутрішня поверхня газорозрядної камери плазмотрону є непрозорою та дифузно-відбивальною;
- струми зміщення не враховуються;
- дисипація енергії за рахунок в'язкості рідини нехтується;
- індуктор замість спіралі спрощено до форми тороїдальних кілець.

У відповідності до прийнятих припущень фізичної моделі математична модель магнітогідродинамічного та теплового стану ВЧІ-плазмотрона описується системою таких рівнянь: нерозривності, Нав'є-Стокса, Максвела у векторно-потенціальній формі та енергії

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0; \\ \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot (\mathbf{v} \mathbf{I}) \right] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}; \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}; \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0; \\ \nabla^2 \mathbf{A} - i\omega \mu_0 \sigma(T) \mathbf{A} + \mu_0 \mathbf{j}_{\text{coil}} = 0; \\ \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} h) = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T) + q_{v_ind} - Q_{rad}, \end{cases} \quad (1)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; ρ – густина середовища, кг/м^3 ; $\mathbf{v}$ – вектор швидкості, м/с ; $\mathbf{I}$ – одиничний тензор другого рангу; p – тиск, Па ; μ – в'язкість, $\text{Па}\cdot\text{с}$; $\mathbf{g}$ – вектор прискорення вільного падіння, м/с^2 ; $\mathbf{j}$ – вектор густини електричного струму, А/м^2 ; $\mathbf{B}$ – вектор магнітної індукції, Тл ; $\mathbf{H}$ – вектор напруженості магнітного поля, А/м ; $\mathbf{A}$ – векторний потенціал електромагнітного поля, Вб/м ; ω – частота, с^{-1} ; μ_0 – магнітна проникність вакууму, Гн/м ; індекс coil – відноситься до індуктора; σ – електропровідність, $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$; $h = \int_0^T c_p(T) dT$ – масова ентальпія, Дж/кг ; c_p – масова ізобарна теплоємність, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; λ – теплопровідність, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$; T – абсолютна температура, К ; $q_{v_ind} = \frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{j}}{\sigma(T)}$ – джоулева теплота у плазмі за рахунок індукованого струму, Вт/м^3 ; $Q_{rad} = \nabla \cdot \mathbf{q}_{rad}$ – дивергенція вектора радіаційного потоку, Вт/м^3 .

Граничні умови:

- на вході в плазмотрон

$$\begin{cases} G_{in} = \rho f_{in} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}); \\ T_{in} = T_1, \end{cases} \quad (2)$$

де G_{in} – витрата плазмоутворюючого газу, кг/с ; f_{in} – площа поперечного перерізу плазмотрона, м^2 ; $\mathbf{n}$ – нормаль до f_{in} ;

- на виході з плазмотрона

$$\begin{cases} \nabla p = 0; \\ \nabla T = 0; \end{cases} \quad (3)$$

- на внутрішній поверхні газорозрядної камери плазмотрона

$$\begin{cases} \mathbf{v} = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_\Sigma = \alpha_{\text{ef}} (T - T_{\text{env.sp.}}), \end{cases} \quad (4)$$

де $\mathbf{q}_\Sigma$ – сумарний тепловий потік, який враховує конвекційну та радіаційну складові, Вт/м²; α_{ef} – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, в якому враховується конвективна та радіаційна складові, Вт/(м²·К) $T_{\text{env.sp.}}$ – температура навколишнього середовища, К;.

– на перерізі соленоїда індуктора

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{j}_{\text{coil}} = j_{\text{coil}}; \\ \omega = 2\pi f; \end{cases} \quad (5)$$

– на периферії повітряного об'єму, в якому розміщено плазмотрон

$$\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0. \quad (6)$$

Методика проведення числових експериментів

Математичне формулювання задачі магнітогідродинаміки та теплового стану плазмотрона (1)–(6) є значно складним для його числової реалізації навіть при застосуванні спеціалізованих програмних продуктів. Тому в роботі було прийнято рішення про розщеплення вихідної задачі на дві більш прості: першу – електромагнітну та другу – тепло-гідродинамічну. Алгоритм розв'язання тепер полягає в тому, що із розв'язку першої задачі отримуємо розподіл внутрішнього джерела теплоти в газорозрядній камері плазмотрону, що пов'язане з циркуляцією індукованого струму у плазмоутворюючому газі (джоулева теплота). Отриманий розподіл джерела теплоти є основою при розв'язанні тепло-гідродинамічної задачі. Зворотний зв'язок між розв'язками другої та першої задач є розподіл температурного поля у газорозрядній камері, від якого залежать електромагнітні властивості матеріалів та середовищ плазмотрона.

Для числової реалізації сформульованої задачі використовувалися програмні продукти ANSYS, зокрема, MAXWELL і FLUENT. У програмному пакеті MAXWELL розраховувалася електромагнітна задача та обчислювався розподіл омичних втрат індукованого струму у плазмоутворюючому газі. Данні отриманих результатів надалі використовувалися для розв'язання тепло-гідродинамічної задачі у пакеті CFD FLUENT.

Для передачі даних з розподілу джоулевої теплоти з MAXWELL у FLUENT застосовувалася апроксимація $q_{\text{v.ind}}(r)$ з використанням полінома 6-го ступеня за допомогою спеціально написаного UDF-файла на мові програмування C, де r – радіус газорозрядній камері плазмотрону

$$q_{\text{v.ind}}(r) = \sum_{i=0}^6 a_i r^i. \quad (7)$$

Числові експерименти показали, що коефіцієнт детермінації залежності (7) становить 0.96. Для передачі розподілу температур з FLUENT у MAXWELL використовувалися програмні засоби ANSYS.

Вихідні дані

Вихідні дані для побудови числових моделей включають: твердотільну модель плазмотрона; фізичні властивості матеріалів та середовищ; граничні умови. Побудова твердотільної моделі плазмотрона виконувалася на підставі креслень приведених у [2]. Фізичні властивості матеріалів та середовищ ВЧІ-плазмотрона бралися зі

стандартних бібліотек FLUENTA та MAXWELLA, властивості плазми бралися з [2,5,6] і наведені в табл.

Таблиця - Властивості плазми

Температура, К	≥ 1000	2000	4000	6000	8000	$10000 \leq$
Електропровідність, $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	700	700	1000	1100	1246	3867
Відносна магнітна проникність	1					
Густина, $\text{кг}/\text{м}^3$	0,239					
Динамічна в'язкість $(\times 10^{-4})$, Па·с	0,4	0,7	1,2	1,8	2,4	2,8
Теплопровідність, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,07	0,12	0,74	2,07	1,75	1,44
Питома теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	129	139	159	473	388	277

Граничні умови при проведенні параметричних розрахунків ВЧІ-плазмотрона варіювалися у таких межах:

- частота струму індуктора – 5; 10; 15; 20; 25 МГц при постійній силі струму 200 А;
- сила струму – 50; 100; 150; 200; 250 А при постійній частоті 20 МГц;
- швидкість та температура плазмоутворюючого газу – 0.5; 1; 2 м/с, 400 °С;
- наявність або відсутність радіаційної складової теплообміну.

Результати числового аналізу

Результати параметричних розрахунків магнітогідродинаміки та теплового стану ВЧІ-плазмотрона представлено на рис. 2–7. Аналіз отриманих даних числового моделювання у ВЧІ-плазмотроні показав, що:

– при зростанні частоти струму на індукторі профіль індукованого струму в камері плазмотрона змінюється з V-подібного на W-подібний (рис. 2);

сила індукованого струму в плазмі прямопропорційна частоті та силі струму на індукторі. При підвищенні частоти та сили струму в 5 разів сила індукованого струму в плазмі і джоулева теплота, відповідно теж зростають в 5 разів (рис. 2–5);

– величина джоулевої теплоти в камері плазмотрона монотонно збільшується зі зростанням її радіусу і набуває максимального майже незмінного значення в периферійній частині газорозрядної камери (на відстані приблизно 1,5 мм від стінки, рис. 3, 5);

– зміна швидкості плазмоутворюючого газу на вході в камеру впливає на розподіл температури та швидкості плазми в поперечному перерізі плазмотрона (рис.

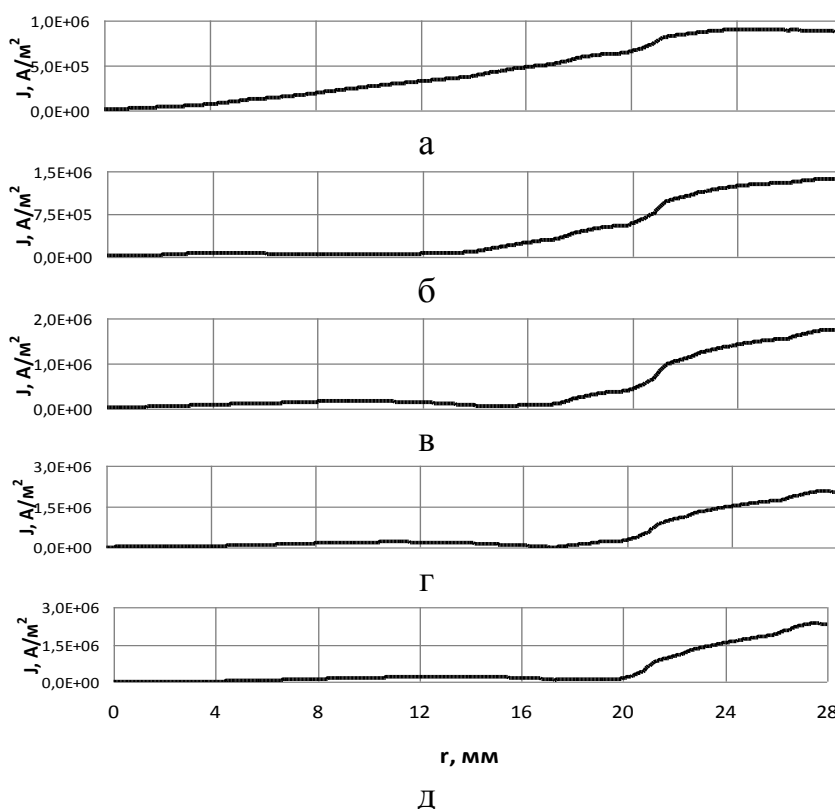


Рис. 2 - Зміна густини індукованого струму, що виникає в плазмі при величині сили струму на індукторі $I = 200 \text{ A}$: а – $f = 5 \text{ МГц}$; б – $f = 10 \text{ МГц}$; в – $f = 15 \text{ МГц}$; г – $f = 20 \text{ МГц}$; д – $f = 25 \text{ МГц}$

6). Збільшення швидкості у 4 рази призводить до незначного зменшення температури плазми у 1,07 (рис. 6б);

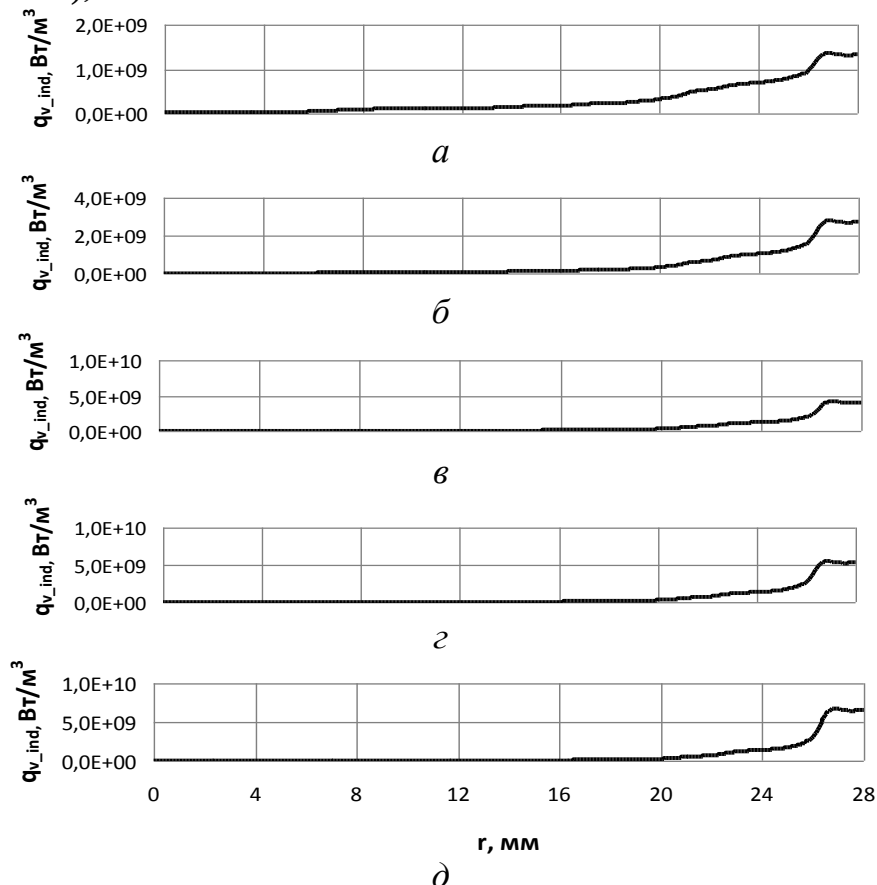


Рис. 3 - Зміна величини джоулевої теплоти, що виникає в плазмі при величині сили струму на індукторі $I=200$ А: *a* – $f=5$ МГц; *б* – $f=10$ МГц; *в* – $f=15$ МГц; *г* – $f=20$ МГц; *д* – $f=25$ МГц

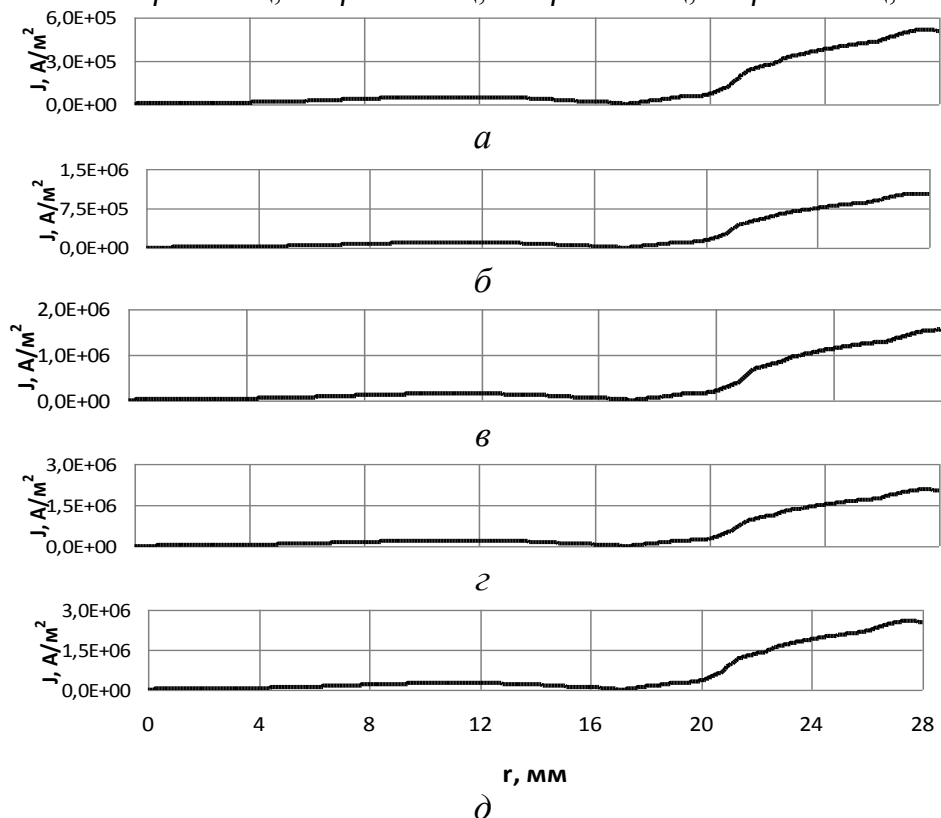


Рис. 4 - Зміна густини індукованого струму, що виникає в плазмі при частоті струму на індукторі $f=20$ МГц: *a* – $I=50$ А; *б* – $I=100$ А; *в* – $I=150$ А; *г* – $I=200$ А; *д* – $I=250$ А

– показано, що рівень температур, який досягається в ВЧІ-плазмотроні при частоті 20 МГц, є достатнім для часткового плавлення і випаровування кварцових гранул, тому що максимальна температура у ядрі плазми перевищує температуру плавлення кварцу (2503 К) при всіх значеннях сили струму (50–250 А) (рис. 7а);

– при числовому аналізі стану плазмотрона обов'язково треба враховувати радіаційну складову теплообміну. В протилежному випадку розрахункова температура плазми може сягати завищених значень (більш ніж у 5 разів, рис. 7б).

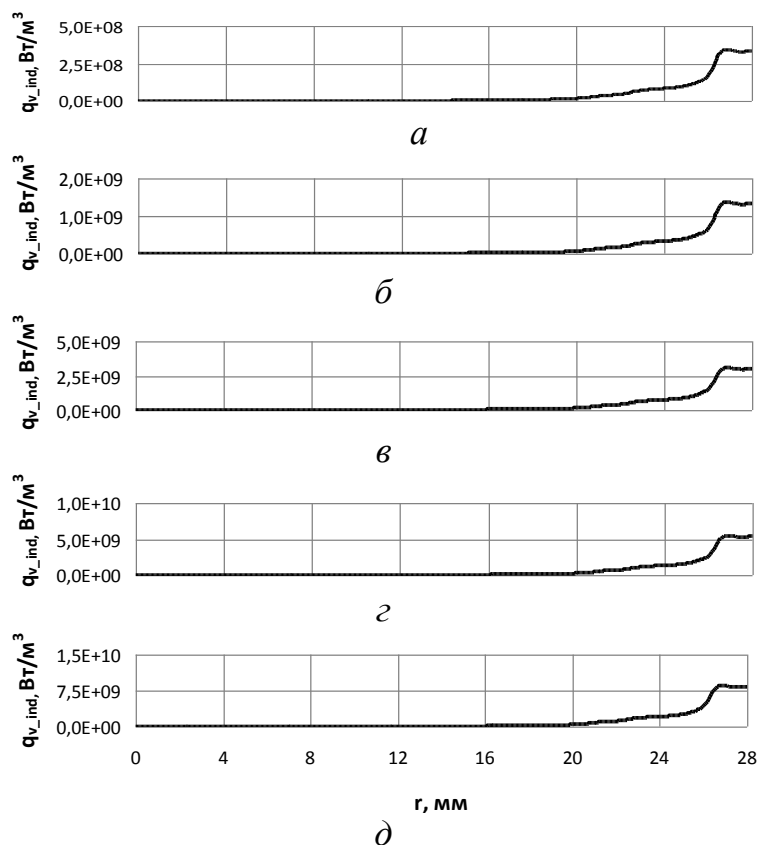


Рис. 5 - Зміна величини джоулевої теплоти, що виникає в плазмі при частоті струму на індукторі $f=20$ МГц: а – $I=50$ А; б – $I=100$ А; в – $I=150$ А; г – $I=200$ А; д – $I=250$ А

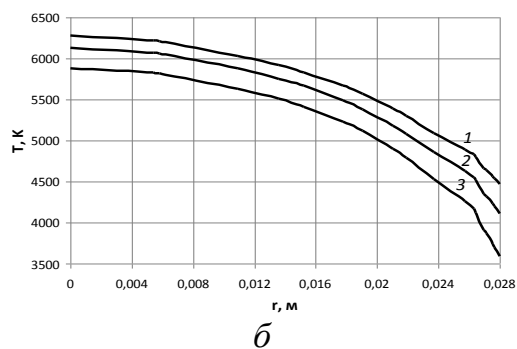
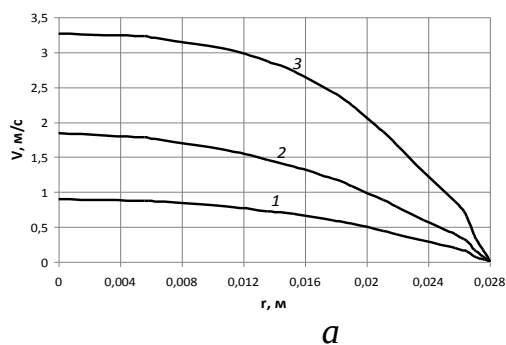


Рис. 6 - Розподіл швидкості (а) та температури (б) в залежності від радіусу камери плазмотрона при зміні швидкості плазмоутворюючого газу на вході в камеру: 1 – 0,5 м/с; 2 – 1,0 м/с; 3 – 2,0 м/с

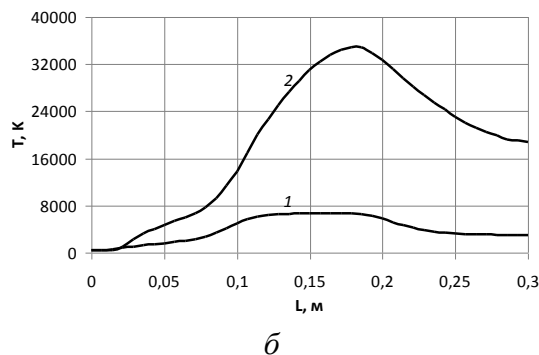
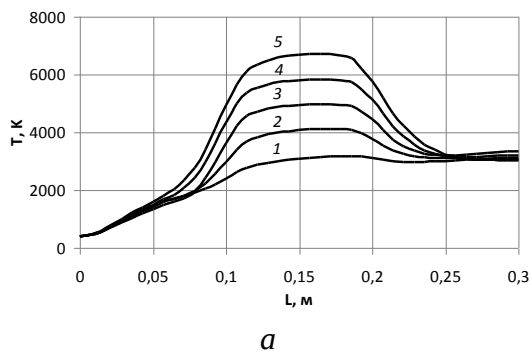


Рис. 7 - Результати досліджень впливу сили струму та радіаційного теплообміну на розподіл температур по осі ВЧІ-плазмотрона: а – вплив зміни сили струму при частоті 20 МГц: 1 – 50 А; 2 – 100 А; 3 – 150 А; 4 – 200 А; 5 – 250 А; б – вплив радіаційної складової теплообміну на розподіл температур при частоті 20 МГц та силі струму 250 А: 1 – з врахуванням радіаційної складової теплообміну; 2 – без врахування радіаційної складової

Висновки

Результати теоретичних досліджень фізичних полів ВЧІ-плазмотрона при сфероїдизації гранул кварцу показали, що: при зростанні частоти струму на індукторі профіль індукованого струму в камері плазмотрона змінюється з V-подібного на W-подібний; рівень температур, який досягається в ВЧІ-плазмотроні при частоті струму 20 МГц, є достатнім для часткового плавлення і випаровування кварцових гранул, тому що максимальна температура у ядрі плазми перевищує температуру плавлення кварцу (2503 К) при всіх значеннях сили струму (50–250 А); при числовому аналізі теплового стану ВЧІ-плазмотрону обов'язково треба враховувати радіаційну складову теплообміну, тому що в протилежному випадку розрахункова температура плазми може сягати надто завищених значень (більш ніж у 5 разів).

Список літератури: 1. *Straub H.J.* Untersuchungen über den Existenzbereich der elektrodenlosen Ringentladung // *Ann. Phys.* — 1958. — Vol. 1. — P. 281 — 295. 2. ВЧ- и СВЧ-плазмотроны / *С. В. Дресвин, А. А. Бобров, В. М. Лелёвкин и др.* — Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1992. — 319 с. 3. Three-dimensional modeling of inductively coupled plasma torches / *D. Bernardi, V. Colombo, E. Ghedini [et al.]* // *Pure Appl. Chem.* — 2005.— Vol. 77, No. 2. — P. 359—372. 4. Моделирование процесса сфероидизации мелкодисперсных частиц кварца в ВЧІ-плазмотроне / *Е. Н. Панов, Н. А. Иванов, В. В. Кондратьев [и др.]* // *Вісник НТУУ “КПІ”. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження.* — 2011. — №1(7) додаток. — С. 85—94. 6. Физические величины : справочник / под ред. И. С. Григорьева. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с. 7. *Краснощеков Е. А.* Задачник по теплопередаче : учебн. пособие / *Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел.* — М. : Энергия, 1969. — 264 с.

Надійшла до редколегії 10.03.2013

УДК 537.84

Математичне моделювання фізичних полів у високочастотному індукційному плазмотроні / **А. Ю. Педченко** // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. — Х: НТУ «ХП», — 2013. - № 11 (985). — С. 167-174. — Бібліогр.: 7 назв.

Разработана математическая модель магнитогидродинамического и теплового состояния ВЧІ-плазмотрона для моделирования процесса сфероидизации кварцевых гранул. Исследовано влияние изменения частоты и силы тока, расходов плазмообразующего газа на поля индуцированного поля в плазме, на распределение полей температуры и скорости в ВЧІ-плазмотроне без и при наличии радиационной составляющей теплообмена.

Ключевые слова: ВЧІ-плазмотрон, магнитогидродинамическое и тепловое состояние, частота, плотность электрического тока, температура, скорость потока плазмы.

This paper deals with a mathematical model of physical fields of high-frequency inductive plasma torch. The results of computational simulation of magnetohydrodynamic thermal state process of spheroidizing of quartz granules are presented by changing such parameters as the frequency and current of the inductor, the velocity of plasma-forming gas, the presence or absence of the radiation component of heat transfer.

Keywords: high-frequency inductive plasma torch, magnetohydrodynamic and thermal state, frequency, current density, temperature, plasma velocity.

УДК621.778

Р. В. БЕЛЯНИН, ПАО «завод «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕДНОЙ КАТАНКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ

На оборудовании ПАО «завод «Южкабель» выполнены исследования на двух партиях непрерывнолитой и непрерывнолитой и прокатанной медной катанки. Получены расчетно-

© БЕЛЯНИН Р. В., 2013