

УДК 621.373.43:537.523

В.І. Чигінь<sup>1</sup>, П.П. Горун<sup>2</sup>, Л.І. Одосій<sup>1</sup>, С.В. Королько<sup>1</sup>, Р.В. Кузьменко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка», Львів

## ПАРАМЕТРИ ПЛАЗМИ КОРОНИ НА ПОВЕРХНІ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В статті наведено чисельне моделювання плазми пульсуючої негативної корони, яка виникає на поверхні літальних апаратів, а також залежності параметрів плазми від концентрації кисню в азоті в області 1...21%. Включено у розгляд такі плазмо-хімічні процеси, як іонізацію молекул азоту і кисню при зіткненні з електронами, прилипання останніх до молекул  $O_2$  і його алотропних форм ( $O$  та  $O_3$ ), а також відлипання електронів від від'ємних іонів. Подано суттєві залежності частоти та амплітуди імпульсів струму і розподілів продуктів реакцій у приповерхневій області плазми 0...0,05 см від концентрації кисню, зокрема, чітке розділення областей генерування атомарного, молекулярного кисню та озону.

**Ключові слова:** чисельне моделювання, коронний розряд, струм, озон.

### Вступ

#### Постановка проблеми та аналіз літератури.

Відомо, що при великих швидкостях польоту літальних апаратів військового призначення в атмосфері на їх поверхнях утворюється шар плазми газового розряду [1]. Він одночасно відіграє як позитивну роль (зниження коефіцієнта тертя), так і негативну (створює перешкоди для радіозв'язку). На наш погляд, одною із причин генерування такої поверхневої плазми є накопичення значного заряду на металічній поверхні апарату через тертя до повітря та ударну іонізацію. При досягненні негативного потенціалу критичного значення на мікровиступах (типу вістря) може виникнути так звана пульсуюча негативна корона [2-3].

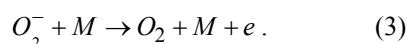
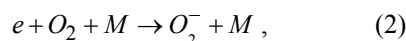
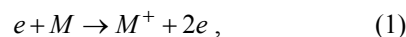
**Метою статті** є чисельна модель імпульсів струму негативної корони з окремого металевого вістря для квазістаціонарного випадку при зміні концентрації кисню в азоті у межах від 1..21 % та аналіз впливу кисню на форму і параметри імпульсів струму, потужність розряду, а також на концентрацію продуктів реакцій ( $O$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ) та їх розподіл біля поверхні апарату.

### Основна частина

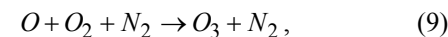
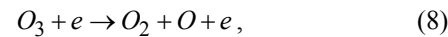
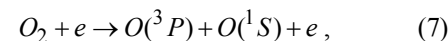
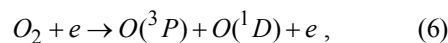
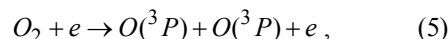
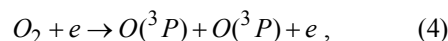
**Плазмо-хімічна модель.** Плазмо-хімічна модель корони базується на рівняннях Больцмана для розподілу електронів за енергіями, для потоків зарядів і Пуасона для електричного поля.

При обчисленнях параметрів струму коронного розряду розглядали такі плазмо-хімічні процеси, як іонізацію молекул азоту ( $N_2$ ) та молекул кисню ( $O_2$ )

внаслідок зіткнень з електронами, прилипання останніх до молекул кисню ( $O_2$ ) і його алотропних форм ( $O$  та  $O_3$ ), а також їх відлипання від від'ємних іонів за наступними схемами:



Крім того, враховували такі реакції, константи швидкостей яких є найбільшими серед багатьох із можливих процесів в азотно-кисневій суміші [4]:



**Фізико-математична модель.** Для чисельного моделювання струму негативної корони використали диференціальні рівняння неперервності для потоків позитивних і негативних іонів та електронів, доповнені рівнянням Пуасона для електричного поля у квазідвовимірному просторі:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \text{div}(v_e n_e) = \alpha n_e v_e - k_a n_e v_e + k_d n_{O_2} n_0 - k_{a,O_3} n_e n_{O_3}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial n_{N_2^+}}{\partial t} - \text{div}(v_{N_2^+} n_{N_2^+}) = \alpha n_e v_e \quad (12)$$

$$\frac{\partial n_{O_2^-}}{\partial t} + \text{div}(v_{O_2^-} n_{O_2^-}) = k_{a,O_2} n_e v_e - k_{d,O_2} n_{O_2} n_0 + k_{a,O_3} n_e n_{O_3}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial n_O}{\partial t} = k_{dis,O_2} n_e n_{O_2}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial n_{O_3}}{\partial t} = k_{ass,O_2} n_O n_{O_2} n_{N_2} - k_{a,O_3} n_e n_{O_3}, \quad (15)$$

$$\text{div}E = 4\pi e(n_{N_2^+} - n_{O_2^-} - n_e), \quad (16)$$

де  $n_e, n_{N_2^+}, n_{O_2^-}, n_O, n_{O_3}$  – концентрації електронів, позитивних  $N_2^+$  і негативних  $O_2^-$  іонів, нейтральних атомів  $O$  та  $O_3$ , відповідно,  $n_0$  – загальна концентрація усіх частинок,  $v_e, v_{N_2^+}, v_{O_2^-}$  – їх дрейфові швидкості,  $\alpha, k_a, k_d, k_{ass}, k_{dis}$  – коефіцієнти іонізації, прилипання, відлипання, асоціації та дисоціації відповідних компонент газової суміші. Розряд відбувається у просторі між катодним вістрям та анодом. Вважається, що концентрація іонів поблизу аноду дорівнює нулеві. Крайова умова для електронів на катоді визначається з вторинної

електрон-іонної емісії:  $j_e(0,t) = \gamma_i \cdot j_{N_2^+}(0,t)$ , де

$$j_e = n_e \cdot v_e \quad \text{і} \quad j_{N_2^+} = n_{N_2^+} \cdot v_{N_2^+}.$$

У всій області розряду температура вважається сталою та приймається рівною 300 К. А константи швидкостей кінетичних процесів покладаються незмінними у часі.

Швидкості дрейфу електронів, позитивних та негативних іонів  $v_e, v_{N_2^+}, v_{O_2^-}$  взято з робіт [5, 6].

Беручи до уваги те, що дисоціативне прилипання електронів до молекул кисню  $e + O^2 \rightarrow O^- + O$  впливає на параметри корони не більш, ніж на 5% [4], цей процес не розглядався. Також не брався до уваги і процес іонізації кисню внаслідок зіткнень та двочастинкових прилипань  $e + O_2 \rightarrow O_2^-$ . Оскільки позитивні та негативні іони просторово розділені протягом періоду пульсації негативної корони [2, 3], а час проходження електронів крізь хмару позитивних іонів (розміщеної у дуже вузькій прикатодній області) є коротким порівняно з тривалістю імпульсу струму, процеси електрон-іонної та іон-іонної рекомбінації не розглядалися. Детальнішу інформацію щодо моделювання можна знайти у роботі [3].

**Аналіз результатів моделювання.** Обчислені параметри імпульсів струму негативної корони суттєво залежать від концентрації кисню [2]. Як видно з рис. 1, частота імпульсів корони спадає при зростанні концентрації кисню від 1% до 21%, а їх амплітуда при цьому різко зростає.

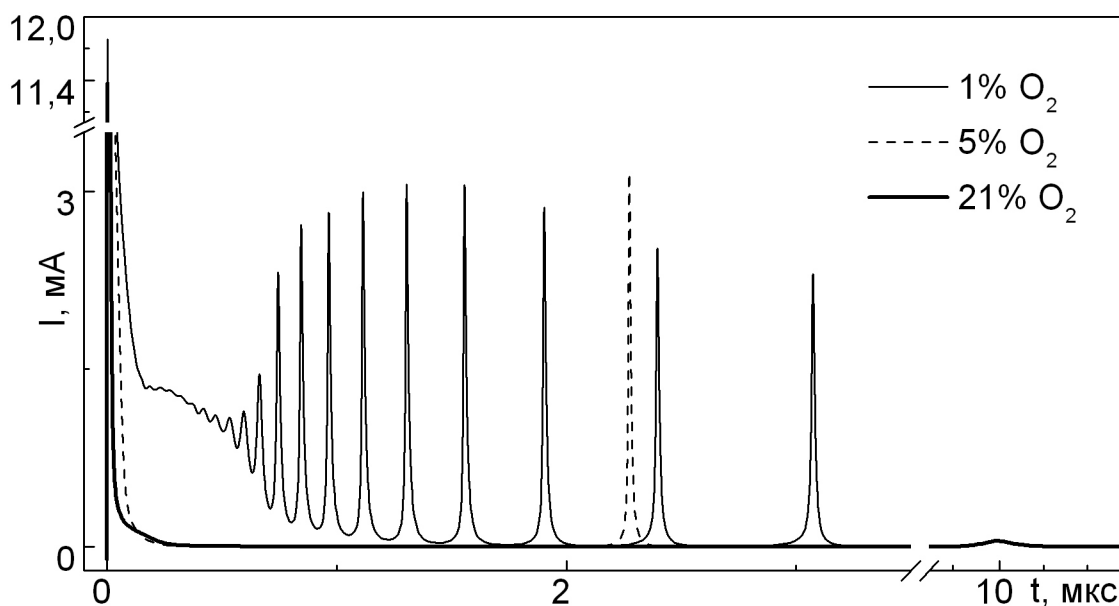


Рис. 1. Залежність струму корони від часу при різних концентраціях кисню

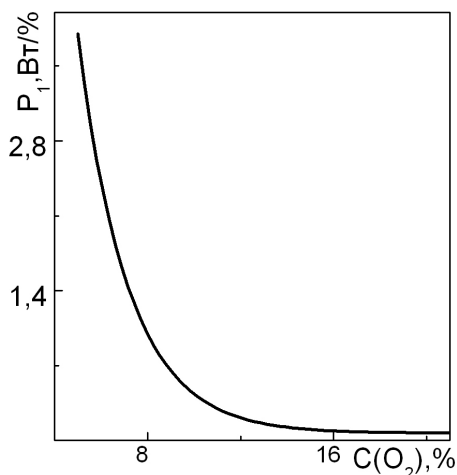


Рис. 2. Залежність потужності розряду від концентрації кисню

Потужність розряду з одного вістря суттєво знижується при рості концентрації кисню в області низьких значень (1–5 %) і слабше спадає при більших концентраціях  $O_2$  (рис. 2).

Протягом проходження першого імпульсу струму коронного розряду при початковій

концентрації молекулярного кисню 21 % концентрація атомарного кисню у прикатодній області різко знижується з ростом віддалі від поверхні коронуючого вістря.

В цей же час концентрація молекулярного кисню у цій області стрімко зростає. В області 0,03 см від поверхні катода і далі концентрації атомарного ( $6 \cdot 10^{18} \text{ l/cm}^3$ ) та молекулярного ( $0,6 \cdot 10^{18} \text{ l/cm}^3$ ) кисню практично не змінюються (рис. 3а).

Після проходження 10 мкс після початку розряду відбувається ріст концентрації атомарного кисню, який має чітко виражений максимум ( $9 \cdot 10^{18} \text{ l/cm}^3$ ) у прикатодній області. На відстані 0,03 см від катода його концентрація різко знижується. На відстані більшій, ніж 0,04 см концентрація атомарного кисню знижується плавніше. При цьому в області 0..0,02 см спостерігається утворення піку молекулярного кисню, концентрація якого в області від 0,02 до 0,05 см від катода зростає інтенсивно, а в області від 0,05 см і далі – повільно (рис. 3б).

З часом область генерування атомарного кисню розширюється.

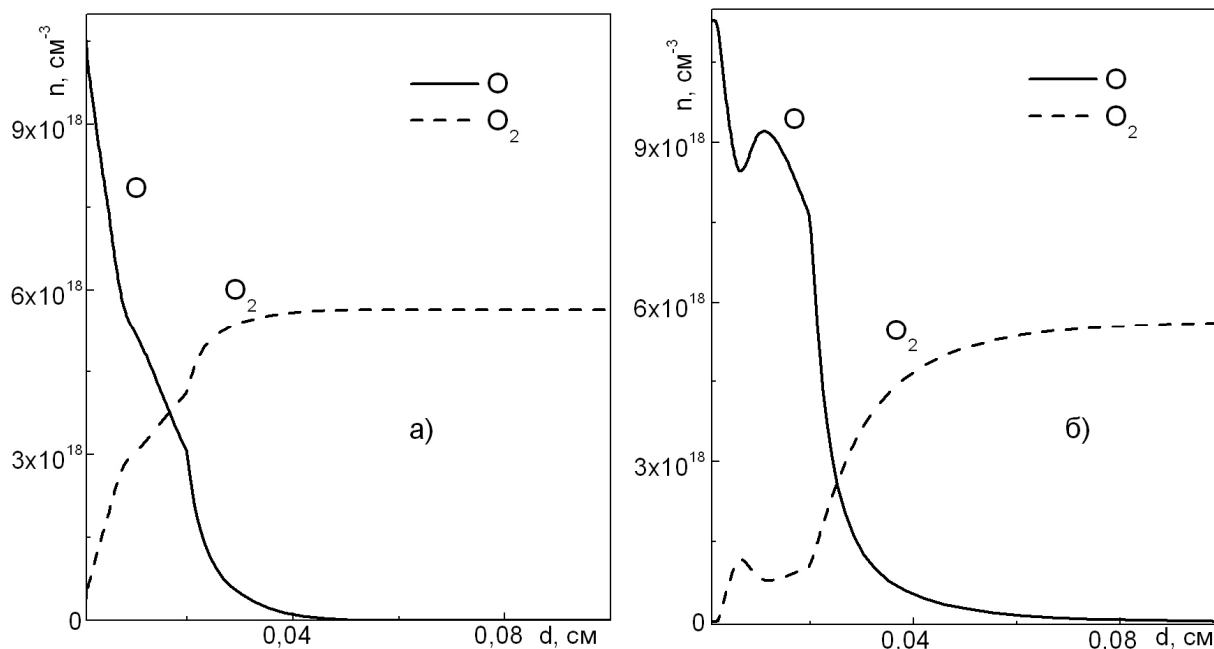


Рис. 3. Залежності концентрації продуктів реакцій від віддалі від поверхні катода (при початковій концентрації кисню 21 %): а) у момент проходження першого імпульсу струму; б) через 10 мкс після початку розряду

Як видно з рис. 4, загальна концентрація озону різко зростає при рості концентрації молекулярного кисню. Найвища концентрація озону ( $1,2 \cdot 10^{18} \text{ l/cm}^3$  при початковій концентрації молекулярного кисню 21 %) утворюється в області 0,03..0,04 см від катода, що знаходиться у кінці області спаду атомарного

кисню. На відстані 0..0,02 см від поверхні катода спостерігається утворення локальних максимумів концентрації озону при всіх розглянутих концентраціях молекулярного кисню, а на відстані більшій, ніж 0,08 см концентрація озону плавно знижується.

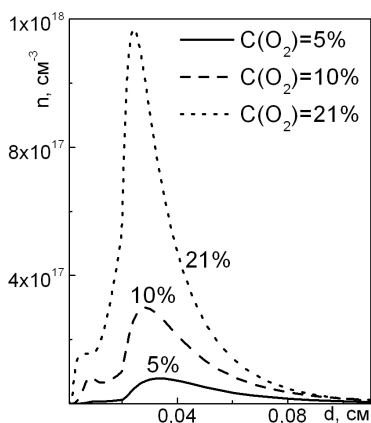


Рис. 4. Залежності концентрації озону від відстані до поверхні катоду при різних концентраціях кисню через 10 мкс після початку розряду

Обчислені залежності середньої сили струму корони і концентрації утвореного озону від концентрації молекулярного кисню зображені на рис. 5. Як видно, при рості концентрації кисню в області менше 6 % спостерігається різкий спад середнього струму, а в області від 6 % до 21 % – крутизна спаду струму знижується. У всій області росту заданої концентрації кисню в азоті (від 1 % до 21 %) плавно збільшується кількість утвореного у плазмі корони озону.

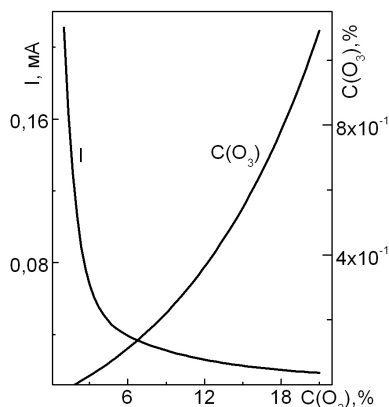


Рис. 5. Залежності середнього струму розряду та концентрації озону від концентрації кисню (через 10 мкс після початку розряду)

## Висновки

Вперше проведено чисельне моделювання струму пульсуючої негативної корони у суміші азоту і кисню при атмосферному тиску з включенням основних плазмохімічних реакцій з участю трьох алотропних форм кисню ( $O$ ,  $O_2$  та  $O_3$ ) дозволило виявити суттєві залежності основних параметрів імпульсів і розподілів продуктів реакцій від концентрації кисню. Зокрема, проявляється суттєве розділення областей генерування атомарного, молекулярного кисню та озону. Знаходження основної маси атомарного кисню із коефіцієнтом в'язкості більшим, ніж молекулярного, безпосередньо на поверхні літального апарату може бути однією із причин зниження тертя поверхні літального апарату до повітря при його польоті.

## Список літератури

1. Web-сторінка: [www.nkau.gov.ua](http://www.nkau.gov.ua).
2. Chyhin V. Intern. Symposium HAKONE VII, Greifswald, (2000), pp. 18-22.
3. Чигинь В.І. Фізичні механізми пульсації негативної корони. – Рукопис // Дис...на здобуття вченого ступеня доктора фіз.-мат. наук. – Харків, 2006. – 257с.
4. I.A. Kossyi. Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures /I.A. Kossyi, A.Yu. Kostinsky, A.A. Matveyev and V.P. Silakov. // Plasma Sources Sci. Technol. 1992. – Vol. 1. – P.207–220.
5. Акишев Ю., Дерюгин А., Каральник В. и др. Экспериментальное исследование и численное моделирование тлеющего разряда постоянного тока атмосферного давления // Физ. Плазмы. - 1994. – Т. 20, №. – С. 571-584.
6. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - М.: Наука. – 1987. – 591 с.

Надійшла до редакції 28.10.2009 р.

## ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ КОРОНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.І.Чигинь, П.П. Горун, Л.І.Одосій, С.В.Королько, Р.В. Кузьменко

В статті приведено расчёт импульсов тока негативной плазмы короны на поверхности летательных аппаратов и изменение концентрации кислорода и его алотропных модификаций.

**Ключевые слова:** численное моделирование, коронный разряд, ток, озон.

## PARAMETERS OF CORONA PLASMA ON THE SURFACE OF THE MILITARY PURPOSE AIRCRAFTS

V.I.Chyhin, P.P. Gorun, L.I.Odosiy, S.V. Korolko, R.V. Kyzmenko

The article is connected with the calculation of the current impulses of negative plasma of corona on the surface of aircrafts and the change of oxygen concentration of its allotrope modification.

**Key words:** numerical modelling, corona discharge, current, ozone.