

О.В. Шефер

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

## ОПТИМАЛЬНІ УМОВИ УТВОРЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ СТОХАСТИЧНОГО ІОНІЗОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА НАВКОЛО КОСМІЧНОГО АПАРАТА

У статті розглянуто конструкцію пристрою та розроблені рекомендації по утворенню оптимальних умов взаємодії низькотемпературної плазми з іонізованим середовищем навколо корпусу КА. У результаті створення слабоаномальних умов та додавання системи елементарних розрядів, об'єм плазми загального від'ємного випромінювання збільшується в 6 разів, має квазінейтральні та еквіпотенціальні характеристики, що утворює оптимальні умови для зменшення щільності середовища радіопоглинання, з метою безперешкодного проходження сигналів супутникового радіозв'язку.

**Ключові слова:** стохастичне іоносферне середовище, низькотемпературна плазма, від'ємне випромінювання, щільність плазми, слабоаномальні умови, космічний апарат, радіосигнал.

### Вступ

**Постановка проблеми й аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останні дослідження взаємодії електромагнітних хвиль з іоносферним середовищем [1] показали, що зменшення щільності високотемпературної плазми, котра утворюється навколо корпусу космічного апарата (КА), цілком можливе та доцільне.

Сучасним методом зменшення щільності іонізованої оболонки, як зазначено у [2], є застосування джерела від'ємного випромінювання – низькотемпературної плазми, котра взаємодіє з плазмовою плівкою, локально зменшуючи її щільність.

Утворення «просвітлених» вікон сприяє безперешкодному проходженню сигналів радіозв'язку із космічного апарату.

Однак забезпечення оптимальних умов утворення низькотемпературної плазми достатньо складна проблема, котра пов'язана із стохастичною поведінкою властивостей іоносферного середовища [2, 3].

Нестабільність властивостей високо-температурної плазмової плівки пов'язана, насамперед, зі зміною швидкості руху КА та зміною концентрації заряджених частинок іоносфери, залежно від висоти [4].

Розв'язання зазначеної проблеми можливе шляхом дослідження умов утворення низькотемпературної плазми та розроблення пристрою для генерації від'ємного випромінювання із оптимальними параметрами.

**Мета роботи** – розроблення пристрою та дослідження умов взаємодії низькотемпературної плазми зі стохастичним іонізованим середовищем навколо КА, для безперешкодного проходження сигналів супутникового радіозв'язку.

### Виклад основного матеріалу

Геометрія розрядного проміжку складається із довжини стрижневих анодів та катодів, розташованих рівномірно по твірній циліндра вздовж внутрішньої циліндричної поверхні розрядної камери.

За такого розташування анод та катод чергуються між собою так, що будь-яка пара сусідніх стрижневих електродів являє собою анод та катод, та утворює окремий елементарний розрядний проміжок. При цьому кожен анод (та катод) знаходиться між двома катодами (анодами).

Така геометрія розташування електродів зв'язує окремі розрядні проміжки в один загальний розрядний проміжок.

Діаметр стрижневих електродів підбирається так, щоб він суттєво не зменшував прозорість розрядного проміжку. Найбільш оптимальний діаметр електродів знаходиться в межах 0,8 – 3 мм. Довжина електродів  $l$  вибиралась так, щоб діаметр розрядного проміжку  $D$  був значно меншим  $l \cdot (D \ll l)$ . Це необхідно для зменшення впливу торцевих неоднорідностей у процесі розряду. В цілому розрядний проміжок являє собою прозорий циліндр, із чіткими межами, як наслідок, розряд у подальшому називається локалізованим.

Для розташування електродів по колу в конструкцію розрядного пристрою введені анодотримачі та катодотримачі. Кожен із цих елементів складається із металевого кільця з отворами для стрижневих анодів (або катодів) та двох циліндричних обойм із діелектрика, котрі повністю ізолюють кінці електродів із кільцем від розрядного процесу (рис. 1).

В анодотримачі всі аноди з'єднані металевим кільцем та мають один вивід через діелектрик у скляну камеру. Аналогічний вивід є від катодотримача.

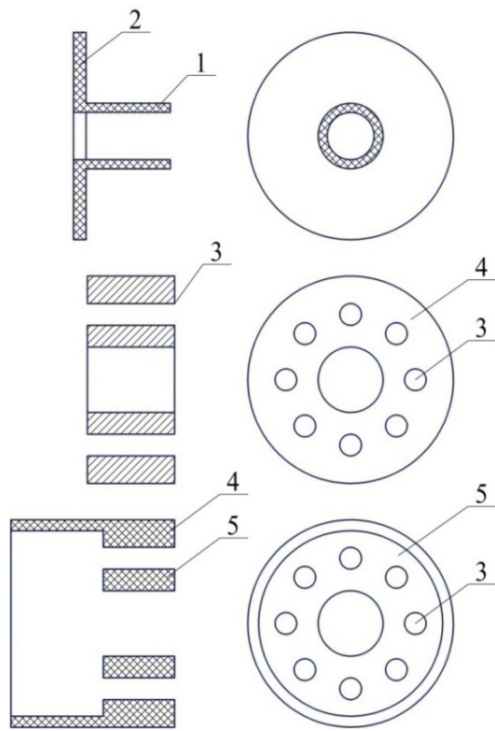


Рис. 1. Конструкція розрядного пристрою:  
 1 – ізоляція електродотримача; 2 – торцева ізоляція;  
 3 – напрямна стрижневих електродів; 4 – металевий електродотримач; 5 – ізолятор електродів

Оскільки плазма локалізованого розряду утворюється в просторі, створеному системою електродів, її поверхня для взаємодії із швидкими електронами значно більша, ніж аналогічна поверхня плазми від'ємного випромінювання звичайного розряду, що жевріє.

За умов достатньо великої протяжності плазми, коли довжина локалізованого розряду  $L$  значно більша за його діаметр  $L \gg D$ , поверхня плазми, котра взаємодіє зі швидкими електронами, є основою. Як наслідок, емісія плазми є єдиним процесом безпосередньої взаємодії із навколишніми тілами, оскільки амбіполярна дифузія зарядоносіїв на внутрішні стінки вакуумної камери малоімовірна. Характерно, що в даному розряді емісія плазми є не двосторонньою, як це має місце в класичній плазмі від'ємного випромінювання, а односторонньою, оскільки стрижневі анод та катод розташовані на дуже малій відстані один від одного.

У результаті використання  $\nu$  - процесів із усієї площі плазми, призведе до більш інтенсивного переносу електричного заряду між анодами та катодами, що повинно вплинути на збільшення електропровідності всього розряду.

У газорозрядному локалізованому пристрої плазма випромінювання утворюється не між електродами, а в центрі електродної системи циліндричного стовпа. Це відбувається в результаті того, що між сусідніми стрижневими електродами встановлюється така відстань  $l$ , за умови вибраного тиску

газу  $p$ , що нормальний розряд не вміщається, тобто має місце умова

$$l_p > l_0 p_0 \quad (1)$$

де  $p_0$  – тиск газу при 133,3 Па,  $l_0$  – відстань між електродами, котра необхідна для розміщення нормального короткого розряду, що жевріє, коли тиск  $p_0$ .

За цієї умови розрядні зони будуть зміщуватись у тому напрямку, де вони мають вільний простір. Оскільки кожна пара стрижневих електродів створює короткий розряд, більше всього зміщується від'ємне випромінювання. Так як центральна область розрядного проміжку вільна від електродів, в неї і зміщуються розрядні зони катодної області.

В розглянутому локалізованому пристрої створюються неповні ускладнені умовами розряду, їх можна назвати односторонні ускладнені умови.

Із експериментальних досліджень компланарного розряду встановлено, що за ускладнених умов анод та катод можна наближати до дуже малої відстані між ними та поєднувати їх в одній площині. На основі цього в локалізованому пристрої стрижневі аноди та катода розміщені на одній циліндричній поверхні на відстані  $0,25l_0$ , тобто:

$$l_p = 0,25l_0 p_0 \quad (2)$$

Близьке розташування стрижневих анодів та катодів під час створення ускладнених умов відображається на характері сумарного електричного поля локалізованого розрядного проміжку. За допомогою електролітичної ванни було проведено дослідження форми розрядного проміжку, котре показало, що в центральній області цього проміжку локалізується еквіпотенціальний простір без електростатичного поля (рис. 2).

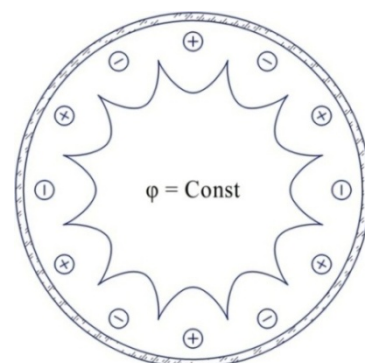


Рис. 2. Геометрія електростатичного поля локалізованого розрядного проміжку:  
 + стрижневі аноди; – стрижневі катода

Ця обставина має суттєвий вплив на плазму локалізованого розряду.

Під час запалювання розряду в локалізованому пристрої між кожною парою стрижневих електродів встановлюється по всій їх довжині короткий розряд,

що жевріє, в котрому внаслідок односторонніх ускладнених умов всі від'ємні випромінювання витісняються в центральну область електродної системи. Оскільки всі від'ємні випромінювання ідентичні, стикаються один із одним та зливаються, вони утворюють одне загальне від'ємне випромінювання, котре має форму яскравого стовпа та розміщується точно по осі всього розрядного проміжку. За вказаних умов радіус плазми загального випромінювання  $r$  визначається як різниця  $R$  та  $d$ :

$$r = R - d \quad (3)$$

де  $d$  – товщина темного крукового простору, котра є функцією тиску газу та аномальності розряду.

За умови усталеного розряду плазму загального випромінювання добре видно у вигляді суцільного циліндра, котрий випромінюється по всій довжині розрядного проміжку. В поперечному випромінюванні форма розряду має вигляд випромінюючого суцільного кола.

Для нормального розряду, що жевріє, виконується рівність  $dr = d_0p_0$ , причому  $d_0p_0$  – приведена товщина темного крукового простору 133,3 Па. Аналогічно можна записати співвідношення і для нормального короткого розряду, що жевріє, де  $l_0p_0 = d_0p_0 + Lp_0$ , тоді

$$lp = l_0p_0. \quad (4)$$

З урахуванням (2) відстань між стрижневими електродами дорівнює:

$$l = \frac{d_0p_0}{4p}. \quad (5)$$

Коли задані радіус розрядного пристрою  $R$  та кількість електродів  $N$ , відстань між електродами дорівнює:

$$l = \frac{2\pi R}{N}. \quad (6)$$

Прирівнявши (4) та (5), отримано, що загальне число стрижневих електродів, необхідних для утворення газорозрядної плазми в пристрої, визначається радіусом  $R$  та тиском газу, котрим наповнений об'єм –  $p$ , матеріалом катода та родом газу  $d_0p_0$ :

$$N = 2\pi \frac{R_p}{d_0p_0}. \quad (7)$$

Між  $N, R$  та  $p$  встановлюється взаємна залежність. Якщо задані  $N, R$  та  $p$ , радіус розрядного проміжку визначається співвідношенням:

$$R = \frac{Nd_0p_0}{8\pi p}. \quad (8)$$

Для будь-якого варіанта конструкції пристрою ( $R$  та  $N$ ), матеріалу катода та роду газу, тиск газу, котрим наповнений об'єм, буде визначатися виразом

$$p = \frac{Nd_0p_0}{8\pi R}. \quad (9)$$

Приведена довжина нормального короткого розряду  $d_0p_0$  визначається із експерименту за мінімальним значенням величини катодного падіння потенціалу  $U_k$ .

Слід зазначити, що за умови постійного діаметру розрядного пристрою за співвідношенням (7) число електродів зростає зі збільшенням тиску газу. В свою чергу тиск  $p$  газу зростає зі зменшенням  $R$  і збільшенням  $N$  та  $d_0p_0$ .

Отже, для дослідження локалізованої плазми, коли тиск газу незначний, геометрія розрядного пристрою повинна мати великий діаметр  $D$  та мінімальне число електродів  $N$ , а за великих тисків – малий  $D$  та великий  $N$ .

Радіус плазми  $r$  повинен визначатися як різниця  $R$  та  $d$  – ширини темного крукового простору.

$$rp = \frac{Nd_0p_0}{8\pi} - dp \quad (10)$$

Однією із характерних властивостей локалізованої плазми, в даному газорозрядному пристрої, є збільшення об'єму за рахунок ефекту, котрий утворюється умовами слабоаномального розряду та додавання великого числа елементарних розрядів. В результаті цього ефекту об'єм плазми загального випромінювання  $V_{\text{за}}$  перевищує сумарний об'єм від'ємного випромінювання всіх елементарних об'ємів, тобто

$$V_{\text{за}} > \sum_{i=1}^n V_i, \quad (11)$$

де  $V_i$  – об'єм окремого від'ємного випромінювання.

Перевищення  $V_{\text{за}}$  відносно  $\sum_{i=1}^n V_i$  можна визначити порівнявши даний розряд із розрядом плоскопаралельного проміжку, в якого площа катода еквівалентна площі всіх катодів багатоелектродного проміжку. В цьому випадку порівняння відношення вказаних об'ємів повинно бути рівним:

$$\gamma = \frac{V_{\text{за}}}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad (12)$$

де  $V_{\text{за}} = \pi r^2 l_c$ ;

$l_c$  – довжина розрядного проміжку, довжина стрижневих катодів;

$r$  – радіус плазми загального випромінювання, котра за експериментальними вимірами, коли тиск аргону  $p = 66,67$  Па, дорівнює 65% радіуса розрядного проміжку.

Оскільки в електродному проміжку, із  $N = 16$ , площа восьми катодів рівна  $S = 8\pi d l_c$ , то сумарний об'єм від'ємних випромінювань буде дорівнювати

$$\sum_{i=1}^n V_i = 8\pi d l_c L_{\text{за}}, \quad (13)$$

де  $d$  – діаметр катодів;  $L_{\text{за}}$  – довжина від'ємного випромінювання, котра, згідно з [5], коли  $p = 66,67$  Па

аргону та відповідному слабоаномальному режимі розряду, рівна  $10^{-2}$  м. Із урахуванням рівності (13) співвідношення об'ємів має вигляд

$$\gamma = \frac{r^2}{8dL_{ca}}. \quad (14)$$

За відповідних однакових умов у вказаних розрядах плазми загального випромінювання більше ніж у 6 раз перевищує сумарний об'єм від'ємного випромінювання ( $\gamma = 6,25$ ). Оскільки в плоскопаралельному проміжку  $L \sim \frac{1}{P}$ , а в багатоелектродному  $r \sim P$ , то зі зростанням тиску газу значення  $\gamma$  стає ще більшим.

Як наслідок, у даному пристрої коли створюються слабоаномальні умови та додаються системи елементарних розрядів, можна значно збільшити об'єм плазми від'ємного випромінювання, окрім того бічна поверхня цієї плазми збільшується ще більше.

## Висновки

У рамках статті розроблено конструкцію пристрою для генерації штучної низькотемпературної плазми. У даному локалізованому пристрої плазма утворюється не між електродами, а в центрі електродної системи циліндричного стовпа. Близьке розташування стрижневих анодів та катодів під час створення ускладнених умов відображається на характері сумарного електричного поля локалізованого розрядного проміжку.

У розробленому пристрої під час створення слабоаномальних умов та додавання системи елементарних розрядів, значно збільшується об'єм плазми від'ємного випромінювання.

В результаті цього ефекту об'єм плазми загального випромінювання перевищує сумарний об'єм від'ємного випромінювання всіх елементарних об'ємів у 6 разів. Окрім того бічна поверхня цієї плазми збільшується в кілька разів.

Низькотемпературна плазма від'ємного випромінювання має еквіпотенціальні та квазінейтральні характеристики.

Зазначені характеристики утворюють оптимальні умови для взаємодії з плазмовою високотемпературною плівкою, з метою локального зменшення її щільності. Як наслідок, утворюються стабільні «просвітлені» вікна, що сприяє безперешкодному проходженню радіосигналів зв'язку із КА.

## Список літератури

1. Гавриленко, В.Г. Распространение электромагнитных волн в неоднородной плазме / В.Г. Гавриленко, В.А. Яшинов // Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 101 с.
2. Шефер, О.В. Формування завадостійкого каналу зв'язку із космічним апаратом шляхом зниження щільності плазми ударної хвилі / О.В. Шефер // Науково-технічний журнал «Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України». – Харків: ХНУПС ім. Івана Кожедуба. – 2017. – №. 2 (27). – С. 131-134.
3. Курнаев, В.А. Плазма- XXI век / В.А. Курнаев. – М.: МИФИ, 2008. – 90 с.
4. Куницын, В.Е, Радиотомография ионосферы / В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева. – М.: Физматлит, 2007. – 345 с.
5. Smirnov, B.M. Theory of Gas Discharge / B.M. Smirnov // Plasma Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, Switzerland. – 2015. – P. 423.

Надійшла до редколегії 15.07.2017

Рецензент: д-р техн. наук, професор С. В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.

## ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПЛОТНОСТИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ИОНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ ВОКРУГ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А.В. Шефер

В статье рассмотрена конструкция устройства и разработаны рекомендации по созданию оптимальных условий взаимодействия низкотемпературной плазмы с ионизированной средой вокруг корпуса КА. В результате создания слабоаномальных условий и добавления системы элементарных разрядов, объем плазмы общего отрицательного излучения увеличивается в 6 раз, имеет квазинейтральные и эквипотенциальные характеристики, образует оптимальные условия для уменьшения плотности среды радиопоглощения, с целью беспрепятственного прохождения сигналов спутниковой радиосвязи.

**Ключевые слова:** стохастическая ионосферная среда, низкотемпературная плазма, отрицательное излучение, плотность плазмы, слабоаномальные условия, космический аппарат, радиосигнал.

## OPTIMAL LOW-TEMPERATURE PLASMA CONDITIONS CREATION FOR THE REDUCTION OF STOCHASTIC IONIZED ENVIRONMENT DENSITY AROUND THE SPACE CRAFT

O.V. Shefer

In this article the construction of device is considered and the recommendations for the optimal conditions of low-temperature plasma interaction with the ionized environment around the SC's corps are developed. As a result of weakly-complicated conditions creation and systems of elementary discharges summation, the volume of plasma with general negative radiation increases in 6 times, has quasi-neutral and equipotential characteristics that creates optimal conditions for density of radio-absorption environment reduction, with the purpose of unimpeded satellite telecommunication signals' passage.

**Keywords:** stochastic ionosphere environment, low-temperature plasma, negative radiation, plasma density, weakly-complicated condition, space craft, radio signal.