

ЗАЛЕЖНІСТЬ СТРУМУ КОРОНИ ВІД ТИСКУ ПОВІТРЯ

О Чигінь В., Проць О., Карп'як С., Горун П., 2008

V. Chyhin, O. Protc, S. Karpyak, P. Horun

DEPENDENCE OF CORONA CURRENT ON PRESSURE OF AIR

О Chyhin V., Protc O., Karpyak S., Horun P., 2008

Вперше виміряно залежність струму негативної корони від тиску повітря в області $1 \cdot 10^{-2} - 7,4 \cdot 10^2$ тор. Створена на цій основі методика дає змогу вимірювати тиск повітря з інтервалом порядку 0,1 секунди. Математична модель струму, яка передбачає іонізацію молекул, прилипання і відлипання електронів, дрейф зарядів і поверхневу іонно-електронну емісію, задовільно описує експериментальну залежність.

Dependence of the negative corona current on pressure of air in the area of $1 \cdot 10^{-2} - 7,4 \cdot 10^2$ tor is first measured. The method for measuring of the pressure of air in the interval of order of 0,1 seconds is created at this base. The mathematical model of the current which includes the molecule ionization, attachment and detachment of electrons, charge drift and surface ion-electronic emission, describes experimental dependence satisfactorily.

Вивчення залежності струму негативної корони від тиску газів є актуальним, зокрема, для створення методики його швидкісного вимірювання під час виготовлення світних ламп (СЛ). Таке вимірювання бажано виконувати в області $1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^3$ тор з інтервалом не гірше 0,1–0,2 с, оскільки відпомповування і наповнення СЛ газами на одній позиції каруселі триває порядку 1,8 с. Однак, досі тиск газів не вимірювався у динамічному режимі через надто велику інерційність відомих давачів і їх вузькі робочі діапазони. Так, теплові давачі типу ВТ-3 і ВСБ-1 мають постійну часу порядку кількох секунд і охоплюють діапазон 0,01–30 тор [1]. Давач термопровідності Пірані [2] володіє такою самою інерційністю. Низькоінерційні давачі деформаційно-газорозрядного типу ПМДГ-1 [3] і мембранно-ємнісного Baratron [2] не охоплюють зазначеного діапазону тиску. Крім того, давачі Пірані, ПМДГ-1 і Baratron є надто громіздкими для значення імітатора лампи у гнізді каруселі. Радіоізотопний давач ВР-4 [1] охоплює $1 \cdot 10^{-4}$ –760 тор і не є інерційним. Проте, супутнє γ -випромінювання і виділення радіоактивного газу радону є значними перешкодами для його використання.

Вибір негативної корони в значенні давача тиску газів зв'язаний з характерною властивістю її пульсації і істотними залежностями параметрів від концентрації електронегативних газів [4]. Так, заряд імпульсів і струм корони істотно знижуються при рості концентрації кисню в аргоні та азоті. У цій праці вперше виконано дослідження залежності струму негативної корони від тиску газу. Нам не відомі інші дослідження такої залежності.

Експериментальна установка

Вимірювали струм на оригінальній установці (рис. 1), яка складається з коронного розрядного пристрою, високовольного блока живлення U , пристрою вимірювання і проміжної пам'яті та інвертора. Розрядний пристрій виготовили у вигляді металевої колби, об'єм якої

дорівнює об'єму типової світної лампи. Катод виготовили у вигляді тонкого тугоплавкого вістря радіусом 20 – 100 мікрон, анод – плоскої металеві пластини-диска діаметром 35 мм (d – довжина розрядного проміжку порядку 0,6 см). У кришці колби вакуумно щільно вмонтували ізоляційні вводи для підведення високої напруги через обмежуючий опір R_0 і виведення низьковольтного сигналу через вимірювальний опір R_B . Високовольтний блок живлення забезпечує максимальний струм розряду 70 мкА і мінімальний струм 0,1 мкА у разі точності індикації $\pm 0,3\%$. Пристрій вимірювання і проміжної пам'яті виготовили на основі АЦП типу ADS1286 і процесора-контролера PIC16F876. Він посилює струми корони порядку часток мікроампера при низьких тисках газу і записує перетворені у цифри дані у тимчасову пам'ять. Інвертор зчитує їх, перетворює у значення тиску газу і відображає на табло індикатора. Колбу приєднали герметично до системи вакуумопроводів, яка об'єднує зразковий манометр і датчик вакууму типу ПМТ-2. Систему попередньо вакуумували за допомогою форпомпи типу 2НВР-5ДМ. Повітря плавно напускали у систему через голчастий клапан.

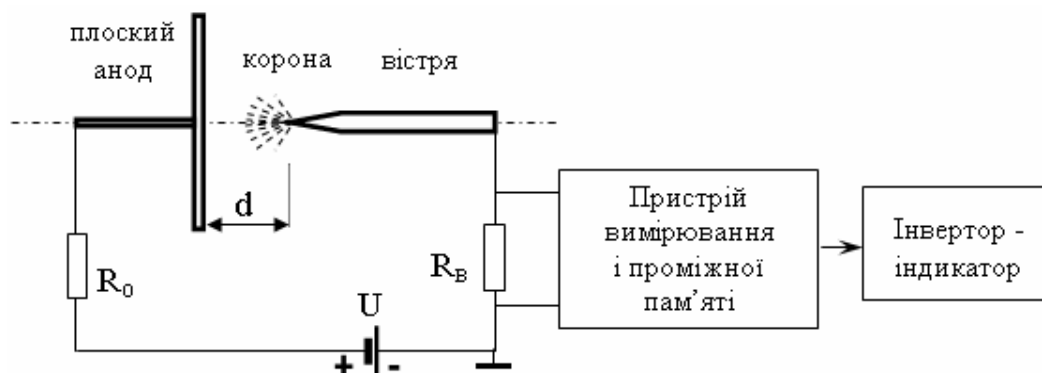


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Результати вимірювань

Під час прикладання постійної напруги порядку 1500–2000 В у сильно неоднорідному полі між вістрям і плоским анодом протікає пульсуючий коронний розряд із усередненим струмом порядку $10^{-6} - 10^{-5}$ А. На рис.3 зображено типовий вимірний графік залежності струму корони I від тиску повітря p у діапазоні $10^{-2} - 740$ тор. Як зрозуміло, форма кривої залежності $I(p)$ є складною – під час зростання тиску повітря струм різко зростає від одиниць до десятків мікроампер в області одиниць тор, формує полого плато в області одиниць-десятків тор і знову плавно спадає до рівня порядку десяти мікроампер за атмосферного тиску повітря.

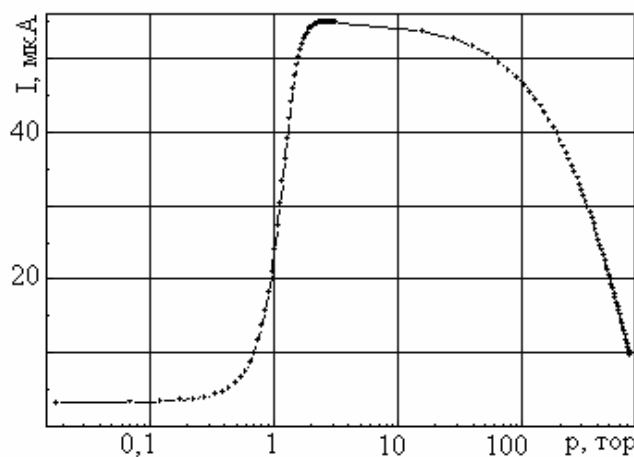


Рис. 2. Типовий вимірний графік залежності струму негативної корони від тиску повітря

На рис. 4 наведено типовий графік залежності струму корони у давачі тиску газу від номера запису кожних 0,2 с під час промивання світних ламп на одній із газо-вакуумних каруселей цехової лінії. Як очевидно, у межах часу перебування лампи на кожній із позицій каруселі (1,8 с) криві струму встигають досягати максимального і мінімального значень – спостерігаються експоненціальні “насичення” струму. Це свідчить про перспективність запропонованого методу швидкісного вимірювання тиску повітря у ламповому виробництві.

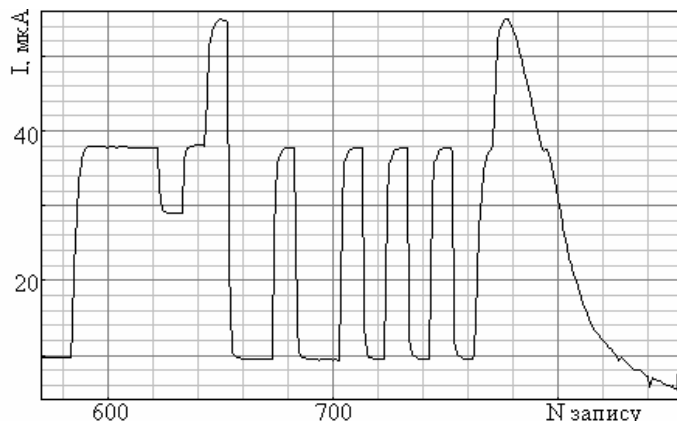


Рис. 3. Типовий вимірний графік залежності струму корони у давачі тиску повітря від номера запису під час промивання світних ламп на каруселі

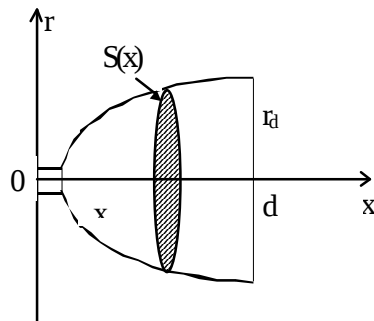


Рис. 4. Форма струмового каналу корони

Фізико-математична модель коронного розряду

Повна кінетична модель газорозрядної плазми, зокрема, у повітрі, може об'єднувати велику кількість взаємодій [4–6] нейтральних та іонізованих частинок (O , O^- , O^+ , O_3 , O_3^- , NO , NO_2 і т.п.). Проте для описання залежності усередненого струму коронного розряду від тиску газу цю модель можна спростити [6], оскільки багато з кінетичних процесів є малоімовірними. Тому для числового моделювання як базові вибрано чотири процеси: ударну іонізацію, електронне прилипання і відлипання, вторинну електронно-іонну емісію, і їх описано такими диференціальними рівняннями у частинних похідних:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (S u_e n_e) = (g_i - g_a) n_e + g_d n, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} - \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (S u_p n_p) = g_i n_e \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (S u_n n_n) = g_a n_e - g_d n_n \quad (3)$$

$$\text{div} E = 4\pi e (n_p - n_e - n_n) \quad (4)$$

де n_e, n_p, n_n – концентрації електронів, додатних і негативних іонів азоту і кисню; u_e, u_p, u_n – їх дрейфові швидкості; γ_i, g_a, g_d – частоти іонізації, прилипання і відлипання, S – площа перерізу трубки струму у розряді. (4) – рівняння Пуассона для електричного поля. Допущено, що швидкості кінетичних процесів перебувають у рівновазі з полем.

Оскільки розрядні характеристики корони володіють осьовою симетрією, то рівняння (1)–(4) достатньо розв'язати у двовимірному випадку. Проте через необхідні для цього значні витрати комп'ютерного часу, використали квазі-двовимірну модель. При тому вважали, що величини E, n_e, n_p, n_n є постійними у кожному поперечному перерізі розрядного проміжку. Для врахування розтікання струму у розрядному проміжку, дивергентні члени рівнянь (1)–(3) записали у вигляді $\frac{1}{S} \frac{\partial S f}{\partial x}$.

Крайові умови для позитивних і негативних іонів є очевидними

$$n_p|_{x=d} = 0, \quad n_n|_{x=0} = 0. \quad (5)$$

Крайові умови для електронів на катоді встановили з врахуванням вторинної електронно-іонної емісії:

$$j_e|_{x=0} = g j_p|_{x=0}, \quad (6)$$

де $j_e = v_e n_e$, $j_p = v_p n_p$, g – коефіцієнт вторинної іонної емісії. Допускаємо, що в момент часу $t = 0$ кількості негативних і позитивних іонів у всьому просторі розряду дорівнюють нулю, а число “затравкових” електронів дорівнює 100. Їх розміщували на незначній віддалі від вістря. Оскільки розряд концентрується біля вістря і займає порівняно велику площу на аноді, форму каналу струму вибрали складною. Виділили дві області: генерування – прикатодну і дрейфу – до віддалі d . Їх форми визначаються різними процесами, залежними від напруженості поля. Область генерування задали у вигляді циліндра із радіусом, залежним від концентрації p -іонів. Її довжину x_L визначали з умови запалювання розряду – інтеграл електронного помноження $M = \int a dx$ від 0 до x_L дорівнює $0.995 \cdot \ln(1 + g^{-1})$. При параметрах корони, близьких до експериментальних, x_L є близькою до 0.02 см. Область дрейфу задали у вигляді параболоїда обертання із радіусом r_d на аноді. Допускали, що струмовий канал не змінює з часом своєї форми.

Для обчислення Лапласового електричного поля E_0 , яке існує у беззарядному проміжку у початковий момент запалювання корони, використали формулу [7]

$$E_0(x) = 2U / [(2x + r_0) \ln(2d / r_0 + 1)], \quad (7)$$

де r_0 – радіус робочої частини вістря. Самоузгоджене поле E визначали із рівняння Пуассона, записаного з врахуванням зовнішнього електричного кола

$$\frac{1}{4\pi} \frac{\nabla E}{t} + s E = \frac{1}{RS} (U - \int E dx), \quad (8)$$

де $s = e(b_e n_e + b_p n_p + b_n n_n)$ – провідність плазми, b_e, b_p, b_n – рухливості електронів, позитивних і негативних іонів. Струм обчислювали, усереднюючи в часі суми потоків позитивних іонів та електронів і струм зміщення на катоді.

Під час моделювання враховували характерні часи τ перебігу різних процесів – часовий крок, який використовується під час розв’язання рівнянь, не повинен бути більшим, ніж τ будь-якого процесу. До них зараховують часи релаксації об’ємного заряду, іонізації, прилипання тощо. Найжорсткіші умови на часовий крок накладає час іонізації $t_i = [a(E)u_e]^{-1}$. У нашому випадку, при напруженості поля $10^4 - 10^5$ В/см, часовий крок задавали в межах $10^{-11} - 10^{-9}$ с.

Для розв’язання диференціальних рівнянь, що описують жорсткі нерівноважні процеси, вибрано модифікований метод із нелінійною корекцією потоків (FCT, [8]), який має найвищий порядок апроксимації і найнижчий рівень числової дифузії. Для оцінок використовували метод біжучого рахунку першого порядку апроксимації, гірший за порядком апроксимації і рівнем числової дифузії, проте, швидший і який забезпечує задовільні результати. Диференціювання виконували на неоднорідній просторовій сітці з 160 комірками і найменшим кроком 10^{-4} см біля поверхні катода. Детальніше про метод числового розв’язування системи рівнянь (1)–(9) можна ознайомитись у праці [9].

Результати числового моделювання

Внаслідок числового моделювання коронного розряду отримано графіки залежності усередненого в часі струму корони від тиску повітря у розрядному проміжку вістря-катод – плоский анод при параметрах розряду, близьких до експериментальних: $d = 0.6$ см, $r_0 = 0.004$ см, $U = 2300$ В, $R = 10^6$ Ом. На рис. 5 показано типові графіки залежності струму від тиску повітря в області

200–740 тор. Як зрозуміло, обчислені значення струмів (крива 2) є достатньо близькими до виміряних в усій області тиску повітря. При нижчих тисках (240–400 тор) кращого узгодження струмів досягнуто за збільшення робочої площі вістря і радіуса прикатодної трубки струму; у випадку 2 радіус катода-вістря і радіус трубки струму у прикатодній зоні збільшуються обернено пропорційно до тиску газу, у випадку 1 ці величини є сталими.

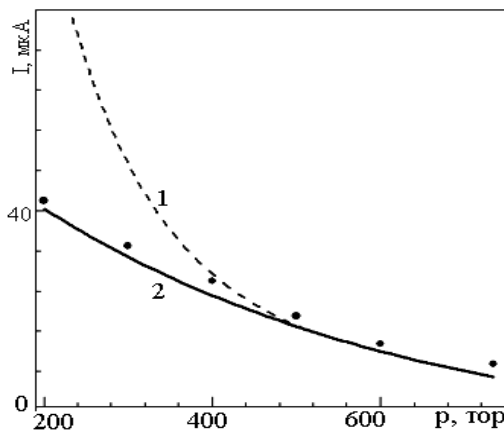


Рис. 5. Залежності струму коронного розряду від тиску повітря: точки – виміряні, 1, 2 – числове моделювання.

Висновки

1. Вперше виміряно складну залежність усередненого струму негативної корони від тиску повітря і частково пояснено її природу.

2. Розроблена методика вимірювання тиску газу є задовільною для використання під час виготовлення світних ламп і перевірки газо-вакуумних систем каруселей на працездатність. Отримані експериментально і теоретично графіки струму достатньо добре описують зміну тиску газу із задовільною для практики обслуговування золотникових карусельних механізмів дискретністю записування і точністю вимірювання.

3. Для детальнішого теоретичного описання складної залежності тиск газу – струм корони варто детальніше опрацювати динаміку змін розмірів робочої поверхні катода і прикатодної трубки струму при тисках, менших 200 тор і переході розряду до жевріючого режиму.

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высш. шк., – 1982. – 209 с. 2. Alcatel vacuum technology for industry and research. Product catalogue. – Alcatel-France. – 369 p. 3. Технічні умови № 2832001-ТУ. Перетворювач манометричний деформаційний газорозрядний ПМДГ-1. – Рязань. 4. Словецкий Д. Моделирование и методы расчета физико-химических процессов в низкотемпературной плазме. – М.: Наука, 1974. – 271 с. 5. Kossyi I., Kostinaky Yu., Matveyev A. Kinetic scheme of non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures // Plasma Sources Sci. Technol. – 1992. – Vol. 1. – P. 207–220. 6. Акишев Ю., Дерюгин А., Каральник В. и др. Экспериментальное исследование и численное моделирование тлеющего разряда постоянного тока атмосферного давления // Физ. плазмы. – 1994. – Т. 20, № 6. – С. 571–584. 7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 591 с. 8. Morrow R., Cram L. Flux-corrected transport and diffusion on non-uniform mesh // J. Comp. Phys. – 1985. – Vol. 57. – P. 129–134. 9. Chyhin V. Physical mechanisms of negative corona current pulse with secondary oscillation // Condens. Matter Phys. – 2002. – Vol. 5, № 3. – P. 429–448.