

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Фізико-математичний факультет
Кафедра загальної фізики та моделювання фізичних процесів

«На правах рукопису»
УДК 533.9.07, 621.384.5

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
Дарія Савченко
(підпис) (ім'я, прізвище)
“ _____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 104 – фізика та астрономія

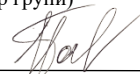
Освітньо – наукова/професійна програма «Комп’ютерне моделювання фізичних процесів»

на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРІЇ КОАКСІАЛЬНИХ
ЕЛЕКТРОДІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ В АЗОТІ»

Виконав: студент другого (магістерського) рівня вищої освіти, групи ОФ-21мп
(шифр групи)

Павшук Єгор Кирилович

(ПІБ)


(підпис)

Науковий керівник
асистент кафедри загальної фізики та моделювання фізичних
процесів, доктор філософії, Майкут Сергій Олексійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)


(підпис)

Консультант Комп’ютерне моделювання тліючого розряду у коаксіальній системі
електродів

(назва розділу)

к.т.н., Сидоренко Сергій Борисович

(науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)


(підпис)

Рецензент доцент кафедри електронних приладів та систем, к.т.н.,
Тугай Сергій Борисович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)


(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент 
(підпис)

Київ – 2024 р.

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет фізико-математичний
(повна назва)

Кафедра загальної фізики та моделювання фізичних процесів
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

Спеціальність 104 – фізика та астрономія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дарія Савченко
(підпис) (ім'я, прізвище)

« » 20 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Павшуку Єгору Кириловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дослідження впливу геометрії коаксіальних електродів на характеристики тліючого розряду в азоті

Науковий керівник дисертації Майкут Сергій Олексійович,
доктор філософії

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «13» 11. 2023р. № 5250-с

2. Строк подання студентом дисертації 09.01.2024р.

3. Об'єкт дослідження Тліючий розряд в азоті, нормальний та аномальний режими тліючого розряду в коаксіальній системі електродів

4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) зміни характеристик плазми тліючого розряду в азоті в коаксіальній системі електродів при різних тисках і радіусах системи

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1. Провести хронологічне вивчення історії відкриття газових розрядів та внеску вчених у цей процес. Ознайомитися з фізичними процесами в плазмі газових розрядів і провести огляд сучасних теоретичних концепцій. Вивчити механізми та умови переходу від несамостійного до самостійного газового розряду.

2. Вивчити основні характеристики тліючого розряду. Дослідити поведінку тліючого розряду в азотному середовищі у тонких трубках. Вивчити особливості та параметри коаксіальних систем електродів, які використовуються для створення тліючого розряду. Здійснити аналіз наукових публікацій та досліджень, присвячених тліючому розряду.

3. Обґрунтувати вибір комп'ютерного моделювання як інструменту для наукових досліджень газорозрядних процесів. Описати використане програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання тліючого розряду в коаксіальній системі електродів. Описати математичну модель, яка використовується для комп'ютерного моделювання тліючого розряду в коаксіальній системі електродів.

4. Описати розроблену модель у середовищі COMSOL Multiphysics, вказавши всі вхідні параметри та вибрані області дослідження. Представити та проаналізувати отримані результати моделювання. Сформулювати рекомендації для можливого застосування отриманих результатів на практиці та вказати можливі напрямки для подальших наукових досліджень у даній області

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Таблиця з початковими даними для проведення моделювання, скріншоти профілів розподілу потенціалу, одномірні графіки розподілу потенціалу і графіки розподілу густини заряджених частинок вздовж радіуса системи, графіки розподілу електронного струму вздовж катода

7. Орієнтовний перелік публікацій

1. Тези «Моделювання тліючого розряду в коаксіальній системі електродів в середовищі COMSOL Multiphysics» у збірнику матеріалів VI Міжнародної науково-практичної конференції «Роль інновацій в трансформації образу сучасної науки».

2. Тези «Дослідження впливу геометрії високовольтного іонного діода на характеристики розряду у азоті» у збірнику матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції «Collective Thinking: Unifying Scientific Approaches in Multifaceted Research».

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Комп'ютерне моделювання тліючого розряду у коаксіальній системі електродів	Сидоренко С. Б., Старший викладач кафедри електронних приладів та систем	09.10.2023р.	19.11.2023р.

9. Дата видачі завдання 01.09.2023р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проходження інструктажу з техніки безпеки та охорони праці	01.11.2023	Виконано
2	Ознайомлення з місцем роботи	01.11.2023	Виконано
3	Вивчення літературних джерел, складання огляду літератури	02.07.2023-02.08.2023	Виконано
4	Пошук і добір фактичних матеріалів, їх групування	03.08.2023-03.10.2023	Виконано
5	Наукові дослідження за темою магістерської дисертації (МД)	04.09.2023-04.11.2023	Виконано
6	Аналіз отриманих результатів	05.11.2023-15.11.2023	Виконано
7	Підготовка розділів МД на основі отриманих даних за темою МД	04.09.2023-25.11.2023	Виконано
8	Підготовка звіту з МД та оформлення презентацій до захисту	26.11.2023-16.12.2023	Виконано
9	Надання роботи на перевірку керівнику МД	17.12.2023	Виконано
10	Отримання відгуку від керівника МД	19.12.2023	Виконано
11	Перевірка МД на плагіат	19.12.23	Виконано
12	Формування плану публікацій за темою МД або документів по впровадженню (лист з	20.12.2023	Виконано

	підприємства або подання проекту впровадження в КПП ім. Ігоря Сікорського)		
13	Подання МД на рецензію	20.12.2023	Виконано
14	Здача МД на нормо-контроль (додержання вимог до оформлення МД)	23.12.2023	Виконано
15	Попередній захист МД	26.12.23	Виконано
16	Виправлення матеріалу МД згідно з зауваженнями комісії на попередньому захисті	27.12.2023-08.01.2024	Виконано
17	Здача МД (друкований та електронний варіанти), Відгуку та Рецензії на кафедру ЗФ та МФП	09.01.2024	Виконано
18	Відправка анотації МД на сайт кафедри ЗФ та МФП	09.01.2024	Виконано
19	Остаточний захист МД	16.01.2024	Виконано
20	Відправка матеріалів МД у бібліотеку КПП ім. Ігоря Сікорського та сайт кафедри ЗФ та МФП	17.01.2024	Виконано
			Виконано

Студент



(підпис)

Є. К. Павшук

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації



(підпис)

С. О. Майкут

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми Актуальність даного дослідження полягає в необхідності розуміння та оптимізації газорозрядних процесів, зокрема тліючого розряду в азоті з використанням коаксіальної системи електродів у вузьких трубках. Це дослідження має велике значення для розвитку нових технологій, таких як плазмові джерела світла, технології обробки матеріалів, та інших важливих виробничих процесів.

Вивчення впливу геометрії коаксіальних електродів на характеристики тліючого розряду може призвести до вдосконалення ефективності та стабільності таких систем. Результати цього дослідження можуть мати практичне застосування в різних галузях, включаючи освітлення, технологічні процеси, та виробництво електроніки.

Застосування комп'ютерних моделей у дослідженнях газорозрядних процесів важливо для швидкого та ефективного вивчення складних фізичних явищ. Цей підхід дозволяє здійснювати віртуальні експерименти та оптимізувати проекти без необхідності фізичного створення прототипів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами _____

«Технологія комбінованого лазерного та імпульсно плазмового нанесення зносостійких покриттів для зміцнення стволів вогнепальної зброї» – д/р № 0121U111822, дата реєстрації: 27-06-2021

Об'єкт дослідження тліючий розряд в азоті, нормальний та аномальний режими тліючого розряду в коаксіальній системі електродів.

Предмет дослідження зміни характеристик плазми тліючого розряду в азоті в коаксіальній системі електродів при різних тисках і радіусах системи.

Мета роботи Основною метою даної науково-дослідної роботи є вивчення впливу зміни геометрії коаксіальних електродів на характеристики та поведінку тліючого розряду в азотному середовищі. Конкретні цілі включають аналіз основних властивостей тліючого розряду, дослідження його поведінки в азоті, вивчення особливостей коаксіальної системи електродів, а також розробку та верифікацію математичної моделі для комп'ютерного моделювання.

Методи дослідження методи математичної фізики, математичне моделювання і чисельний розрахунок для дослідження тліючого розряду у двомірній моделі коаксіальної системи електродів.

Задачі дослідження

1. Провести хронологічне вивчення історії відкриття газових розрядів та внеску вчених у цей процес. Ознайомитися з фізичними процесами в плазмі газових

розрядів і провести огляд сучасних теоретичних концепцій. Вивчити механізми та умови переходу від несамостійного до самостійного газового розряду.

2. Вивчити основні характеристики тліючого розряду. Дослідити поведінку тліючого розряду в азотному середовищі у тонких трубках. Вивчити особливості та параметри коаксіальних систем електродів, які використовуються для створення тліючого розряду. Здійснити аналіз наукових публікацій та досліджень, присвячених тліючому розряду.

3. Обґрунтувати вибір комп'ютерного моделювання як інструменту для наукових досліджень газорозрядних процесів. Описати використане програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання тліючого розряду в коаксіальній системі електродів. Описати математичну модель, яка використовується для комп'ютерного моделювання тліючого розряду в коаксіальній системі електродів.

4. Описати розроблену модель у середовищі COMSOL Multiphysics, вказавши всі вхідні параметри та вибрані області дослідження. Представити та проаналізувати отримані результати моделювання. Сформулювати рекомендації для можливого застосування отриманих результатів на практиці та вказати можливі напрямки для подальших наукових досліджень у даній області.

Наукова новизна одержаних результатів Дане дослідження вносить суттєвий внесок у розуміння газорозрядних процесів, зокрема тліючого розряду в азотному середовищі з використанням коаксіальних електродів. Новизною є комплексний підхід до вивчення взаємозв'язку між геометрією електродів та ключовими характеристиками розряду, що раніше не було представлено в літературі. Основними науковими досягненнями є детальний аналіз основних властивостей тліючого розряду при різних тисках і радіусах системи електродів. Розробка та верифікація математичної моделі для комп'ютерного моделювання розкриває нові можливості для прогнозування поведінки розряду за різних умов.

Практичне значення одержаних результатів Результати дослідження можуть бути використані в розробці нових електротехнічних пристроїв, де використання газового розряду є ключовим елементом. Оптимізація геометрії електродів дозволить підвищити ефективність та стабільність роботи пристроїв, що базуються на тліючих розрядах. Крім того, отримані результати можуть бути використані для розробки нових технологій в галузі освітлення, електроніки, азотування внутрішніх поверхонь тонких трубок та інших сфер, де використання газових розрядів в азоті є актуальним. Практична значимість цих досліджень полягає в можливості вдосконалення існуючих технологій та впровадженні нових, що сприятиме підвищенню рівня технологічного розвитку.

Апробація результатів дисертації

1. Участь в VI Міжнародній науково-практичній конференції «Роль інновацій в трансформації образу сучасної науки» з публікацією тез «Моделювання тліючого розряду в коаксіальній системі електродів в середовищі COMSOL Multiphysics» у збірнику матеріалів конференції

2. Участь в III Міжнародній науково-практичній конференції «Collective Thinking: Unifying Scientific Approaches in Multifaceted Research» з публікацією

тез «Дослідження впливу геометрії високовольтного іонного діода на характеристики розряду у азоті» у збірнику матеріалів конференції.

Публікації автора магістерської дисертації

1. Павшук Є. Моделювання тліючого розряду в коаксіальній системі електродів в середовищі COMSOL Multiphysics. Роль інновацій в трансформації образу сучасної науки : Матеріали VI Міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 23–24 груд. 2022 р. Запоріжжя, 2022. С. 143–147.

2. Андрієнко О., Павшук Є., Сидоренко С. Дослідження впливу геометрії високовольтного іонного діода на характеристики розряду у азоті. Collective Thinking: Unifying Scientific Approaches in Multifaceted Research : The collection of abstracts presents the materials of the participants of the International scientific and practical conference, Amsterdam, 29 листоп. – 1 груд. 2023 р. 2023. С. 321–327.

Ключові слова тліючий розряд, коаксіальна система електродів, циліндрична система електродів, розряд в азоті, комп'ютерне моделювання, плазма розрядів, COMSOL Multiphysics

В роботі наведено: використаної літератури - 104, сторінок: - 126, рисунків - 36, таблиць - 6.

ABSTRACT

Actuality of theme The relevance of this research lies in the necessity to understand and optimize gas discharge processes, particularly the glow discharge in nitrogen using a coaxial electrode system. This study is crucial for the development of new technologies, such as plasma light sources, material processing technologies, and other essential industrial processes.

Investigating the influence of the geometry of coaxial electrodes on the characteristics of the glow discharge can lead to improvements in the efficiency and stability of such systems. The findings of this research may find practical applications in various fields, including lighting, technological processes, and electronics manufacturing.

The application of computer models in the study of gas discharge processes is essential for the rapid and effective exploration of complex physical phenomena. This approach allows for virtual experiments and optimization of designs without the need for the physical creation of prototypes.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes _____

«Technology of combined laser and pulsed plasma application of wear-resistant coatings for strengthening firearm barrels» – project No. 0121U111822, registration date: 06/27/2021

The object of research The glow discharge in nitrogen, normal and abnormal modes of the glow discharge in a coaxial electrode system.

The research subject Changes in the characteristics of the plasma in the glow discharge in nitrogen in a coaxial electrode system at different pressures and system radii.

Purpose of work The main objective of this scientific research is to study the influence of changes in the geometry of coaxial electrodes on the characteristics of the glow discharge in nitrogen. Specific goals include the analysis of the basic properties of the glow discharge, investigation of its behavior in nitrogen, study of the features of the coaxial electrode system, and the development and verification of a mathematical model for computer simulation.

Research methods Methods of mathematical physics, mathematical modeling, and numerical calculations will be employed to investigate the glow discharge in a two-dimensional model of the coaxial electrode system.

Research tasks _____

1. Conduct a comprehensive study of the history of the discovery of gas discharges and the contributions of scientists to this process. Thoroughly investigate the physical processes in the plasma of gas discharges and provide an overview of modern

theoretical concepts. Study the mechanisms and conditions of the transition from non-self-sustained to self-sustained gas discharge.

2. Examine the main characteristics of the glow discharge. Investigate the behavior of the glow discharge in a nitrogen environment. Study the features and parameters of coaxial electrode systems used to create the glow discharge. Analyze scientific publications and research dedicated to the glow discharge.

3. Justify the choice of computer modeling as a tool for scientific research on gas discharge processes. Describe the software used for computer modeling of the glow discharge in a coaxial electrode system. Develop and describe the mathematical model used for computer modeling of the glow discharge in a coaxial electrode system.

4. Describe the model developed in COMSOL Multiphysics, specifying all input parameters and selected areas of study. Present and analyze the results of modeling. Formulate recommendations for the practical application of the obtained results and suggest possible directions for further scientific research in this field.

Scientific novelty of the results This research significantly contributes to the understanding of gas discharge processes, particularly the glow discharge in a nitrogen environment using coaxial electrodes. The novelty lies in a comprehensive approach to studying the relationship between electrode geometry and key discharge characteristics, not previously presented in the literature. Major scientific achievements include a detailed analysis of the fundamental properties of the glow discharge under different pressures and electrode system radii. The development and verification of a mathematical model for computer simulation reveal new possibilities for predicting discharge behavior under various conditions.

The practical significance of the results The research findings can be applied in the development of new electro-technical devices where the use of gas discharge is a key element. Optimizing electrode geometry will enhance the efficiency and stability of devices based on glow discharges. Additionally, the results can be applied to the development of new technologies in lighting, electronics, nitrogenation of inner surfaces of thin tubes, and other areas where the use of gas discharges in nitrogen is relevant. The practical significance of this research lies in the potential improvement of existing technologies and the introduction of new ones, contributing to the advancement of technological development.

Approbation of the results of the thesis

1. Participation in the VI International Scientific and Practical Conference "The Role of Innovations in Transforming the Image of Modern Science" with the publication of the thesis "Modeling of the Glow Discharge in a Coaxial System of Electrodes in the COMSOL Multiphysics Environment" in the conference proceedings.

2. Participation in the III International Scientific and Practical Conference "Collective Thinking: Unifying Scientific Approaches in Multifaceted Research" with the publication of the thesis "Investigation of the Influence of the Geometry of a High-Voltage Ion Diode on the Characteristics of the Discharge in Nitrogen" in the conference proceedings.

Publications

1. Pavshuk Y. Modeling of the Glow Discharge in a Coaxial System of Electrodes in the COMSOL Multiphysics Environment. The Role of Innovations in Transforming the Image of Modern Science: Materials of the VI International Scientific and Practical Conference, Kyiv, December 23–24, 2022. Zaporizhzhia, 2022. Pp. 147–151.

2. Andriienko O., Pavshuk Y., Sidorenko S. Investigation of the Influence of the Geometry of a High-Voltage Ion Diode on the Characteristics of the Discharge in Nitrogen. Collective Thinking: Unifying Scientific Approaches in Multifaceted Research: The collection of abstracts presents the materials of the participants of the International Scientific and Practical Conference, Amsterdam, November 29 – December 1, 2023. 2023. Pp. 321–327.

Keywords glow discharge, coaxial system of electrodes, cylindrical system of electrodes, discharge in nitrogen, computer modeling, plasma discharges, COMSOL Multiphysics

The work contains: references - 104, pages - 126, figures - 36, tables - 6.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГАЗОВІ РОЗРЯДИ.....	16
1.1 Короткий огляд історії відкриття газових розрядів.....	16
1.2 Процеси в плазмі розрядів.....	21
1.3 Перехід від несамостійного газового розряду до самостійного.....	28
1.4 Класифікація та застосування газових розрядів	33
1.4.1 Тихий розряд. Іскровий розряд.....	35
1.4.2 Дуговий розряд.....	37
1.4.3 Тліючий розряд	39
Висновки до Розділу 1	41
РОЗДІЛ 2 ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД В КОАКСІАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОДІВ В АЗОТІ	42
2.1 Основні властивості тліючого розряду.....	42
2.2 Тліючий розряд в азоті	50
2.3 Коаксіальна система електродів	53
2.4 Огляд досліджень тліючого розряду.....	57
Висновки до Розділу 2	61
РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ У КОАКСІАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОДІВ	62
3.1 Комп'ютерне моделювання як інструмент досліджень	62
3.2 Програмне забезпечення, використане для моделювання.....	69
3.3 Опис математичної моделі для дослідження тліючого розряду у коаксіальній системі електродів.....	78
Висновки до Розділу 3	84
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ.....	85
4.1 Опис моделі, розробленої в COMSOL Multiphysics	85
4.2 Результати моделювання та їх аналіз.....	96
4.2.1 Розподіл потенціалу	96

4.2.2 Розподіл густини частинок (електрони, позитивні і негативні іони).....	101
4.2.3 Електронний струм на катоді.....	105
4.3 Рекомендації для практичного застосування і подальших досліджень	110
Висновки до Розділу 4	112
ВИСНОВКИ.....	113
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	114

ВСТУП

В галузі дослідження газорозрядних явищ в азоті роль тліючих розрядів стає все більш важливою, особливо з урахуванням їхнього широкого застосування в різноманітних технологічних процесах. Розуміння впливу геометрії коаксіальних електродів на характеристики тліючого розряду має велике значення для оптимізації та покращення цих процесів.

З метою глибшого розкриття цієї теми, дослідження спрямовані на аналіз процесів в газорозрядній плазмі при зміні геометрії електродів в коаксіальних системах.

Однією з ключових стратегій для вивчення газорозрядних явищ є використання комп'ютерних моделей. Використання таких моделей надає можливість враховувати складні фізичні процеси, які не завжди можна ефективно вивчати експериментальними методами. Віртуальне моделювання дозволяє отримувати глибше розуміння внутрішньої динаміки газорозрядних систем, що, в свою чергу, допомагає удосконалювати і оптимізувати різноманітні технологічні процеси.

Однак існуючі виклики, такі як точність моделювання та врахування різноманітних факторів, вимагають подальших досліджень. Точні та перевірені комп'ютерні моделі можуть служити потужним інструментом для аналізу газорозрядних явищ, забезпечуючи можливість передбачення та оптимізації їхньої роботи в різних умовах.

В Розділі 1 надається короткий огляд історії відкриття газових розрядів, розглядаються процеси, що відбуваються в плазмі розрядів і перехід від несамостійного газового розряду до самостійного. Також розглядається класифікація та сучасне застосування газових розрядів.

Розділ 2 зосереджений на характеристиці і основних властивостях тліючого розряду, особливості застосування тліючого розряду в азоті та в коаксіальній системі електродів. Проводиться літературний огляд раніше проведених досліджень у цьому напрямку.

Розділ 3 розкриває сутність комп'ютерного моделювання як інструменту досліджень та надає огляд використаного програмного забезпечення для моделювання. Детально розглядається математична модель, що використовується для дослідження тліючого розряду в коаксіальній системі електродів.

В Розділі 4 детально описана розроблена модель у середовищі COMSOL Multiphysics, надаються деталі її параметрів та особливостей. Розглядаються результати чисельного моделювання та їх аналіз для різних параметрів системи, включаючи геометрію коаксіальних електродів. Також надаються практичні рекомендації для застосування отриманих результатів та вказівки на можливі напрямки подальших наукових досліджень.

Дане дослідження націлене на розробку і верифікацію комп'ютерної моделі тліючого розряду в азоті в коаксіальних системах електродів. Застосування такої моделі відкриває перспективи для розуміння впливу різних факторів на характеристики розряду, що, в свою чергу, може мати практичне застосування в розробці нових технологій та оптимізації існуючих.

Такий підхід дозволяє отримати повне уявлення про фізичні процеси в газорозрядних системах. Отримані результати можуть виявитися важливим внеском у розвиток науки та техніки, а також служити основою для подальших досліджень у цьому напрямку. Тому тема цього дослідження є актуальною.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГАЗОВІ РОЗРЯДИ

1.1 Короткий огляд історії відкриття газових розрядів

Протягом понад 100 років фізики були зацікавлені численними цікавими явищами, що відбуваються в газах під дією електричного поля. Вивчення "електричного розряду в газах" або "газового розряду", як зазвичай називають це явище, призвело до багатьох фундаментальних відкриттів. Протягом другої половини XIX століття та більшої частини XX століття ця область досліджень була тісно пов'язана з основним напрямком розвитку фізики. Навіть якщо розуміння цих явищ не завжди було повним, їх дослідження призвело до таких фундаментальних відкриттів, як відкриття катодних променів [1, 2], рентгенівських променів (які в деяких джерелах називають Пулюївськими на честь І. Пулюя, який незалежно від Рентгена винайшов цей вигляд випромінювання на декілька років раніше) [3-6], встановлення властивостей електронів і атомів [7], створення оптичної спектроскопії та мас-спектрометрії [8, 9].

Явища в газовому розряді тепер часто розглядаються як частина більш широкої галузі – фізики плазми, яка привертає увагу все більшої кількості фізиків, так як стає очевидним, що більша частина речовини у Всесвіті перебуває в стані плазми – у четвертому стані речовини.

Термін "пробій", який використовується для опису процесу ініціювання розряду, є виправданим у випадках, коли постійна напруга, яка прикладається до газорозрядної трубки, поступово зростає до критичного значення, при якому газ раптово починає світитися і стає провідним. Зрозуміло, що в першу чергу та найбільш інтенсивно досліджувалися значення напруг, при яких газ "пробивається" або починається іскристість. Подібні дослідження протягом багатьох років займали центральне місце в вивченні явищ газового розряду [10].

Під терміном «газовий розряд» зазвичай розуміють усі явища та процеси, пов'язані з протіканням електричного струму через газ [11].

Сучасна фізика термін газовий розряд трактує у більш широкому значенні. Це – не тільки процес протікання струму через газ, а й будь-який процес виникнення іонізації газу під дією електричного поля. При цьому поле може бути не тільки постійним у часі, а й швидкозмінним – високочастотним, надвисокочастотним і навіть оптичного діапазону [12-15]. Терміни «горіти», «запалювання» набули поширення тому, що при виникненні досить сильної іонізації газ світиться [16].

Сама назва розряд походить від назви повільно протікаючого процесу втрати заряду зарядженими металевими тілами, розташованими на підставці з ізолятора, що спостерігалось ще в XVI столітті. Пізніше Кулон [17] експериментально довів, що заряд стікає з провідника через повітря, а не через підставку з ізолятора, тобто, за сучасною термінологією, має місце газовий розряд. Розряд при низьких тисках повітря (близько 1 мбар) відкрив і досліджував Фарадей [18] – цей розряд став відомий як тліючий.

Також варто відзначити внесок Майкла Фарадея в дослідження різниці потенціалів, при якій виникає іскровий розряд. Він виявив, що перший імпульс іскрового розряду – перескок першої іскри між електродами – відбувається при вищій різниці потенціалів, ніж подальший перескок іскор, і що після кожної іскри властивість газу, яка сприяє проходженню нової іскри, зберігається протягом кількох хвилин [19]. Він також виявив вплив полярності електродів розрядного проміжку на потенціал іскрового пробою у випадку, коли обидва електроди відрізняються за розмірами та геометричною конфігурацією [20].

Дуговий розряд був відкритий В. В. Петровим [21] в 1803 році. Через декілька років після цього незалежно від нього дуговий розряд також отримав та дослідив фізик Дейві в Англії. Обидва вони отримали вольтову дугу, використовуючи велику батарею елементів, між кінцями стержнів з деревного вугілля. І той, і інший стверджували, що вольтова дуга може бути використана

для освітлення. Однак стрижні-електроди в дугових лампах швидко згорали, і під час експлуатації їх доводилося підсовувати один до одного, що призводило до мерехтіння та швидкого загасання таких ламп. Дуговий розряд отримав свою назву через те, що він виглядає, як видовжена іскра або "дуга", яка виникає між двома електродами під впливом високої напруги. Така назва допомагає легко розпізнавати цей вид електричного розряду, оскільки вона відображає його вигляд і форму.

Наприкінці XIX століття дослідження провідності розріджених газів привело Дж. Дж. Томсона [22-25] до відкриття першої елементарної частинки – електрона, а подальші дослідження фізики газового розряду багато в чому послужили експериментальною основою атомної та квантової фізики [26].

Засновником фізики газового розряду вважається учень Дж. Дж. Томсона Таунсенд [27], який на початку XX століття створив теорію пробою газу та встановив закономірності іонізації. Серед важливих досягнень Таунсенда була розробка експериментальних методів для вивчення поведінки газів під впливом електричного поля. Він провів багато досліджень, що допомогли встановити закони розряду газів та визначити вплив різних параметрів, таких як тиск та напруга, на ці процеси. Таунсенд також сприяв розвитку ідеї про іонізацію газів, що стало важливим компонентом розуміння газового розряду. Він досліджував, як збільшення напруги впливає на кількість утворених іонів у газі та інші властивості газового розряду [28-30].

Наукова спадщина Таунсенда в газовій фізиці і фізиці газового розряду залишається значущою і впливовою досі. Його внесок допоміг сформулювати основні принципи цієї галузі фізики і поклав початок подальшим науковим дослідженням у цьому напрямку.

Теорія Таунсенда була значно розширена у 1931-1932 роках завдяки роботі Роговського [31-33], який врахував спотворення поля в розряді через просторові заряди. Це дало можливість більш повно уявити процес переходу розряду від несамостійного до самостійного і також розширити теорію на

самостійний тліючий розряд. Явище термоелектронної емісії було досліджено досить глибоко і вичерпно англійським фізиком Річардсоном приблизно у 1900 році [34]. Річардсон розробив першу кількісну теорію цього елементарного процесу.

Також принциповий внесок у фізику газового розряду було внесено Ленгмюром [35], який разом із Тонксом у 1928 році, досліджуючи газовий розряд низького тиску, ввів таке фундаментальне поняття фізики, як плазма, а також розвинув методи дослідження плазми, зокрема метод зондів [36-39].

У 1920-1930-х роках дослідники активно вивчали газові розряди з високочастотними полями. Це привело до розробки плазмових джерел, які використовувалися для генерації мікрохвильового випромінювання. Ця робота знайшла застосування в радіоелектроніці та комунікаційних системах.

У другій половині ХХ століття були зроблені значущі кроки в розумінні газових розрядів та їх застосувань. Розроблені газові лазери, які мають велике значення в дослідженнях і технологіях, зокрема, у медицині та матеріалознавстві.

За останні 25 років газові розряди і плазма стали ще більш важливими об'єктами дослідження та застосування. Розвиток наукових інструментів та технологій дозволив виявити нові явища і реалізувати їх у великій кількості сфер, починаючи від сучасних джерел світла і закінчуючи реакціями ядерного синтезу.

Одним із ключових досягнень за останні роки була розробка нових видів газових лазерів та плазмових джерел. Дослідники зуміли вплинути на характеристики лазерного випромінювання, створивши лазери з більшою потужністю та ширшим спектром випромінювання. Це знайшло застосування у великій кількості галузей, зокрема в медицині для операцій і лікування, а також для обробки матеріалів.

Завдяки сучасним науковим дослідженням і розвитку технологій, газові розряди стали більш доступними та ефективними в різних галузях науки і промисловості. Вони відкривають нові можливості для розвитку технологій.

1.2 Процеси в плазмі розрядів

Процес збудження частинки (атому, молекули або іона) полягає в переході одного з зовнішніх електронів атому або іона на вищий енергетичний рівень. Тут ми переважно розглядаємо збудження саме зовнішнього, або, іншими словами, валентного або оптичного електрона. Така термінологія застосовується через те, що зовнішній електрон визначає хімічні властивості атома, тобто його валентність. При спонтанному переході збудженого атома на більш низький енергетичний рівень зазвичай випромінюється квант в оптичному діапазоні довжин хвиль. Тому зовнішнього електрона також називають оптичним [40].

Іонізація, по суті, представляє собою крайній випадок збудження, коли електрон, зв'язаний у атомі, набуває енергії, достатньої для відокремлення від атома та переходу у неперервний спектр. Завдяки процесам іонізації у газі утворюються заряджені частинки, що забезпечують провідність газу, тобто сприяють запаленню газового розряду. У цьому контексті іонізація є одним із основних елементарних процесів у розряді.

Однак важливо враховувати, що збудження також відіграє надзвичайно важливу роль в механізмі підтримки плазми та передачі струму. Зіткнення електронів з атомами, які призводять до збудження атомів, становлять значну частину всіх зіткнень між електронами та нейтральними частинками. Тому як у кінетиці частинок, так і в балансі потужності, яка виділяється в газі, збудження нейтральних частинок займає важливе місце. Наявність великої кількості збуджених атомів і молекул змінює багато властивостей газу, через який протікає струм, наприклад, знижує його ефективний потенціал іонізації. Збудження призводить до випромінювання, яке впливає на розвиток струму в газі та є одним із зовнішніх ознак розряду і джерелом інформації при оптичній діагностиці плазми. Практичні застосування розряду як активної середовища газових

лазерів та джерел світла пов'язані з характеристиками розряду як випромінюючого об'єкта [41].

Кожен з елементарних процесів, результатом якого є збудження, може призводити до іонізації, якщо для цього вистачає енергії. Це не означає, що обидва ці процеси можна описати за однаковими фізичними концепціями. Навпаки, збудження в своїй суті є квантовим процесом і не піддається класичному опису. Для іонізації багато корисних висновків та фізичного розуміння особливостей процесу можуть бути зроблені на основі класичного розгляду. Проте нашою метою є показати особливості явищ іонізації та збудження в газорозрядній плазмі, не поглиблюючись занадто глибоко в фізику самого процесу зіткнення. Оскільки як і іонізація, так і збудження є наслідком одних і тих самих реакцій, нам зручніше об'єднати розгляд цих процесів в межах одного розділу.

Надамо класифікацію елементарних процесів, які викликають іонізацію та збудження. По-перше, можна розділити ці процеси на дві групи: іонізація та збудження внаслідок зіткнень частинок і фотопроеци [41].

В першій групі ми окремо розглянемо зіткнення частинок з електронами і непружні зіткнення важких частинок. Електрон, стикаючись з атомом у основному стані, може викликати іонізацію або збудження за такою схемою:



де A – атом, e – електрон, A^+ – іон, A^* – збуджений атом.

Такі реакції називаються реакціями прямої іонізації та прямого збудження, або іонізацією та збудженням з основного стану атома.

Крім того, електрон може зіткнутися з вже збудженим атомом. У цьому випадку ми говоримо про процес ступенчатої іонізації або ступенчатого

збудження на більш високий енергетичний рівень. Ступенчаті процеси відбуваються за такою схемою:



де A^{**} – двічі іонізований атом.

Розглядаючи непружні зіткнення важких частинок, доцільно розділити всю сукупність елементарних процесів на дві групи: удари першого роду та удари другого роду (в деяких джерелах «надпружні удари»).

Удари першого роду включають іонізацію та збудження, при цьому витрачається кінетична енергія важкої частинки (атома або іона), наприклад:



де B – важкий атом, B^+ – важкий іон.

До ударів другого роду відносяться такі, де процес збудження або іонізації однієї частинки відбувається за рахунок потенційної енергії збудження іншої частинки, наприклад:



При взаємодії атомів і молекул з фотонами можна виділити пряму і ступінчасту іонізацію, а також так звану багатофотонну іонізацію. Останній процес можливий лише при великих концентраціях світлової енергії в одиниці об'єму, що досягається в фокусі випромінювання потужних імпульсних лазерів. Якщо б такої концентрації потужності не було, то енергії одного фотона було б недостатньо, щоб навіть здійснити збудження з основного стану. Однак завдяки

одночасному впливу декількох фотонів стає можливим не лише збудження, але і відрив електрона від атома.

Іонізація в умовах розряду може здійснюватися електронним ударом, термічно, під впливом квантів випромінювання та іншими способами.

1. Іонізація при електронному ударі. Типова функція іонізації при електронному ударі зростає від енергії іонізації до 100-150 еВ, а потім повільно спадає (Рисунок 1.1) [42].

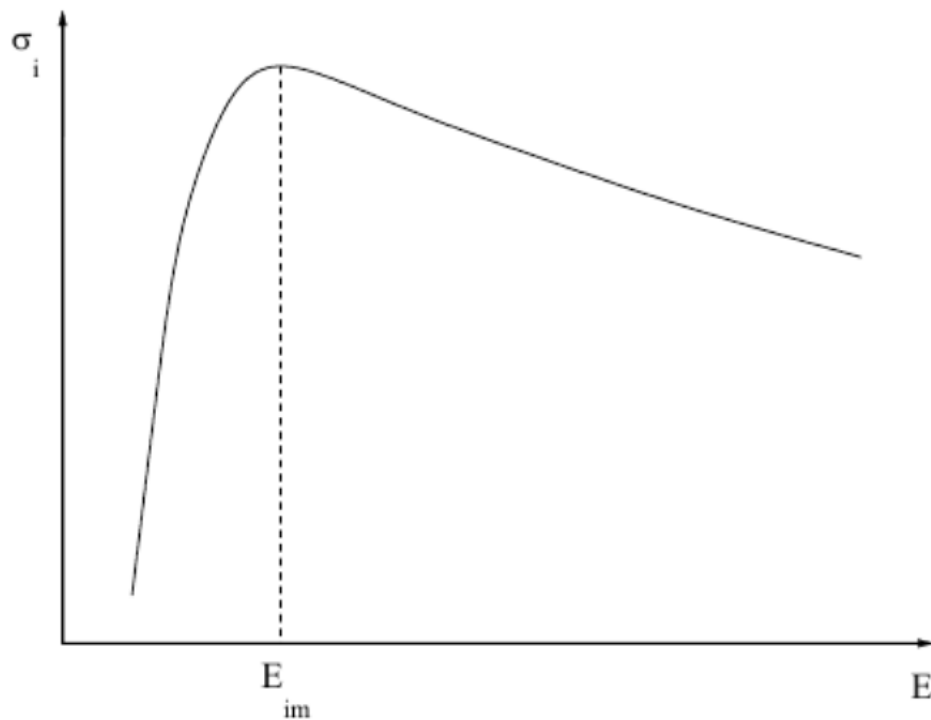


Рисунок 1.1 – Типовий вигляд функції іонізації [42]

Спад перетину іонізації при великих енергіях електронів пов'язаний зі скороченням часу взаємодії, в результаті чого молекула або атом не встигає поляризуватися.

2. Термічна іонізація полягає у відриві електрона від атома або молекули при нагріванні газу в умовах термодинамічної рівноваги. В якості кількісного показника процесу термічної іонізації зазвичай

використовується ступінь іонізації α , який представляє відношення концентрації електронів або іонів до концентрації атомів, включаючи й іонізовані. Термічна іонізація характерна головним чином для дугових розрядів, а також для магнітогідродинамічних генераторів та деяких інших плазмових пристроїв.

3. Фотоіонізація полягає в відриві електрона від атома або молекули під дією кванта випромінювання. Основною умовою фотоіонізації є $h\nu \rightarrow eU_i$, де $h\nu$ – енергія фотона, а eU_i – потенціал іонізації. Оскільки потенціали іонізації більшості газів та парів досить великі, для фотоіонізації необхідні фотони ультрафіолетового або рентгенівського випромінювання. Функція фотоіонізації (залежність перетину процесу від енергії фотона) зазвичай має гострі максимуми. Фотоіонізація відіграє помітну роль у іскрових розрядах.

В умовах розряду мають місце також процеси термічної дисоціації, фотодисоціації та дисоціації при електронному ударі. Перші два типи реакцій можна розглядати аналогічно відповідним іонізаційним процесам.

Розглянемо детальніше дисоціацію молекул при електронному ударі. До дисоціації можуть призводити збудження електронних станів молекул, і в цьому випадку можуть реалізовуватися три сценарії:

1. Збудження нестабільних станів або переходи на відштовхувальні гілки потенціальних кривих стабільних станів. Прикладом такої дисоціації є збудження нестабільного стану молекули водню.
2. Збудження стабільних станів, з яких можлива переддисоціація внаслідок взаємодії з нестабільними станами. Переддисоціація є характерною для таких молекул, як азот і оксид вуглецю. Ймовірність переддисоціації дуже велика для більшості багатоатомних молекул (трьох, чотирьох тощо).
3. Збудження стабільних станів з подальшим каскадним переходом в стан, що належить першим двом типам. Залежності перетинів

дисоціації від енергії електронів в цьому випадку відповідають закономірностям процесу збудження.

Важливо відзначити, що до дисоціації також може призводити ряд процесів, пов'язаних з утворенням заряджених частинок, таких як дисоціативна іонізація та дисоціативне прилипання. Останній процес може виступати як важливий канал для утворення атомів під час розряду в галогенах. Також можлива дисоціація молекул при збудженні коливальних станів під час електронного удару [42].

Рекомбінація – це процес зіткнення носіїв протилежного знака, який призводить до їх взаємної нейтралізації. Якщо обидва носії є іонами, то процес називається іон-іонною рекомбінацією, а якщо один з них – електрон, то тоді електрон-іонною рекомбінацією. Коефіцієнт рекомбінації заряджених частинок, позначений як α , можна знайти, якщо відома швидкість втрати носіїв заряду в газі після припинення іонізації.

Під час рекомбінації двох протилежних зарядів їхня загальна внутрішня енергія повинна зменшуватися. Ймовірність цього процесу залежить від того, наскільки система здатна позбутися надлишку енергії. За обов'язковими законами збереження імпульсу і моменту кількості руху перехід енергії, що виділяється під час рекомбінації, в кінетичну енергію частинки, що утворюється, майже неможливий. Тому рекомбінація заряджених частинок може відбуватися через один з наступних каналів:

- передача енергії третьому тілу;
- випромінювання кванта світла;
- збудження утворених нейтральних частинок;
- якщо один або обидва іони є молекулярними, то можлива дисоціативна рекомбінація.

Теоретичні і експериментальні дослідження процесу рекомбінації показали, що випромінювальна рекомбінація є дуже малоїмовірною порівняно з іншими видами рекомбінації, і її можна ігнорувати у більшості випадків.

Зазначені вище розгляди є застосовними як для електрон-іонної, так і для іон-іонної рекомбінації. У умовах газорозрядної плазми низького тиску найбільш суттєвою є дисоціативна рекомбінація, коефіцієнт якої може сягати 10^{-6} см³/с. При великих тисках (понад 1 атм) головну роль зазвичай відіграє рекомбінація при тройних зіткненнях. Коефіцієнт рекомбінації зменшується зі збільшенням "температури" стикаючихся частинок [43].

1.3 Перехід від несамостійного газового розряду до самостійного

Першу модель переходу несамостійного розряду в самостійний було запропоновано Таунсендом. Наслідуючи Таунсенда, введемо коефіцієнт об'ємної іонізації α , чисельно рівний кількості електронно-іонних пар, що утворюються одним електроном на одиниці довжини шляху. По сенсу зрозуміло, що цей коефіцієнт залежить від тиску (зростає зі збільшенням числа зіткнень, тобто з тиском) і від напруженості електричного поля E (зростає з полем).

В [44] розглянуто, як відбувається іонізація у газовому проміжку між плоскими електродами – катодом та анодом (Рисунок 1.2). Наведемо деякі викладки для розуміння процесів розряду.

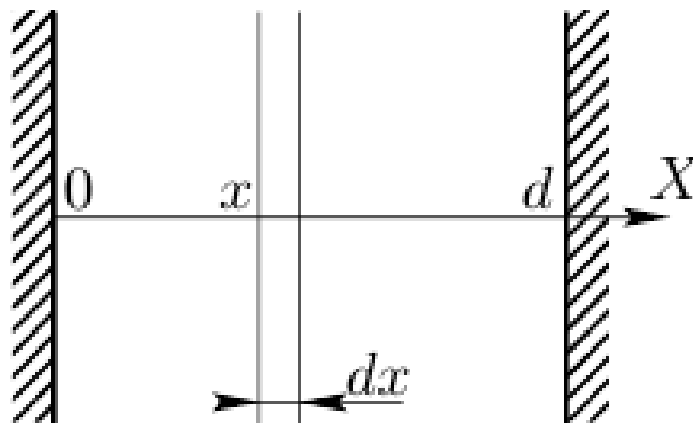


Рисунок 1.2 – До виведення критерію Таунсенда [44]

На відстані x від катода у шарі товщини dx один електрон створює αdx пар іонів. Якщо з боку катода в цей шар втікає електронний струм I_e , то в шарі він зросте на величину $dI_e = I_e \alpha dx$. Інтегрування цього рівняння в припущенні,

що α не залежить від x (тобто поле не залежить від x , що вірно лише за малих струмів, коли немає об'ємних зарядів), дає наступне:

$$I_e(x) = I_e(0)e^{\alpha x}, \quad (1.8)$$

де $I_e(0)$ – електронний струм, що витікає з катода в газовий проміжок.

Можна бачити, що на аноді, тобто за $x = d$, він зростає в $e^{\alpha d}$ разів. Це і є режим газового посилення, тобто розмноження електронно-іонних пар унаслідок розвитку електронних лавин. Однак при цьому розряд ще не обов'язково переходить у режим самостійного. Наприклад, якщо струм $I_e(0)$ створюється тільки зовнішнім іонізатором, то при його вимкненні припиняється струм через проміжок. Щоб розряд не припинявся, потрібно, щоб струм $I_e(0)$ підтримувався самим розрядом, тобто, щоб утворився позитивний зворотний зв'язок. Такий зв'язок може встановлюватись лише через потік частинок, що рухаються з розряду у зворотному напрямку – до катода. У моделі Таунсенда це – позитивні іони та фотони. Далі враховуватимемо лише позитивні іони.

Повний струм через будь-який поперечний переріз розряду $x = \text{const}$ один і той самий, і складається зі струму, що переноситься електронами, і струму, що переноситься позитивними іонами, які рухаються їм назустріч. Отже, повний струм на аноді дорівнює електронному струму $I_e(d)$, а іонний струм на катоді $I_i(0)$ дорівнює

$$I_i(0) = I_e(d) - I_e(0) = I_e(0)(e^{\alpha d} - 1). \quad (1.9)$$

Нехай тепер кожен іон, що потрапив на катод, вибиває з катода в середньому γ вторинних електронів (γ – коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії, $\gamma = 10^{-1} - 10^{-3}$). Тоді з катода піде струм цих вторинних електронів I_2 :

$$I_2 = \gamma I_i(0) = \gamma I_e(0)(e^{\alpha d} - 1), \quad (1.10)$$

а повний електронний струм з катода складатиметься зі струму I_1 , утвореного зовнішнім іонізатором, і струму вторинних електронів I_2 :

$$I_e(0) = I_1 + I_2 = I_1 + \gamma I_e(0)(e^{\alpha d} - 1), \quad (1.11)$$

тоді

$$I_e(0) = \frac{I_1}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}. \quad (1.12)$$

Таким чином, повний струм через газовий проміжок I_i , рівний електронному струму через анод, буде дорівнювати:

$$I_i = I_e(d) = I_e(0)e^{\alpha d} = \frac{I_1 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}. \quad (1.13)$$

З підвищенням напруги на газовому проміжку, тобто зростанням електричного поля, зростають коефіцієнти α і γ , і зростає струм. Проте розряд залишається несамостійним, так як при виключенні зовнішнього іонізатора ($I_1 = 0$) струм обертається в нуль. Однак при досягненні деякого значення поля знаменник цього виразу звернеться в нуль, а струм – в нескінченність при будь-якому малому значенні I_1 , так що зовнішній іонізатор можна взагалі прибрати. Це і є перехід від несамостійного розряду до самостійного, чи явище пробою, умова якого – критерій Таунсенда, що має вигляд

$$\Gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1. \quad (1.14)$$

Величина

$$\mu \equiv \gamma(e^{\alpha d} - 1) \quad (1.15)$$

називається коефіцієнтом відтворення, оскільки вона показує, скільки електронів відтворюється на катоді в результаті проходження через розряд одного електрона, що вийшов з катода. Знаючи функції $\gamma(E)$ і $\alpha(E)$, з цієї умови можна визначити напруженість електричного поля, достатню для пробую, пробивну напругу або, у разі розряду, потенціал запалення U_z . Ця теорія добре підтверджує експериментально встановлений закон Пашена, згідно з яким потенціал запалення залежить тільки від тиску на довжину розрядного проміжку, причому ця залежність має мінімум (Рисунок 1.3) [45].

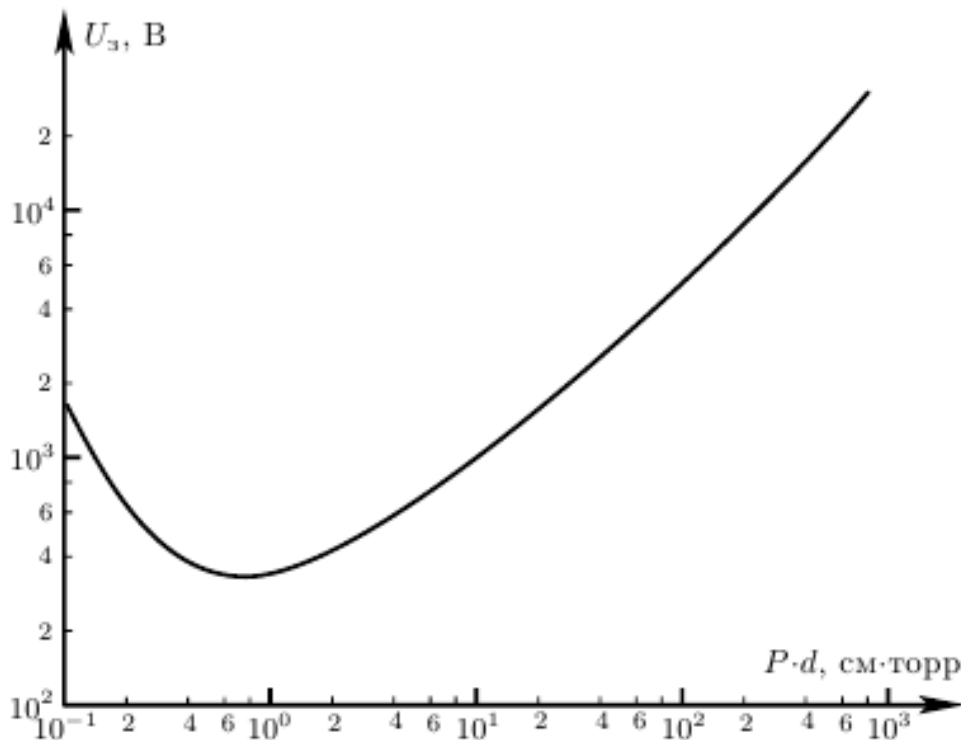


Рисунок 1.3 – Залежність потенціалу запалення U_z від добутку тиску p і довжини d розрядного проміжку (крива Пашена) для повітря [45]

Таким чином, для заданого тиску є така довжина розрядного проміжку, при якій потенціал запалення та відповідне поле мінімальні. Нагадаємо, що в моделі Таунсенда поле в проміжку однорідне і не спотворюється об'ємними зарядами, що вірно лише для розряду з дуже малим струмом. Такий самостійний розряд відомий як темний таунсендівський розряд. Описаний процес пробую також називають таунсендівським. У газах високого тиску (більше атмосферного) і при великих довжинах проміжків реалізується інший механізм пробую – стримерний, або іскровий, а нестационарний розряд, що виникає в результаті такого пробую, відомий як іскровий. Прикладом такого розряду є блискавка.

1.4 Класифікація та застосування газових розрядів

У широкому значенні термін електричний пробій означає перетворення ізолятора на провідник в результаті застосування до нього досить сильного поля. Для газу це означає перехід у іонізований стан. При цьому зростання струму призводить до ще більшого зростання концентрації іонів, що призводить до зростання провідності i , отже, зниження напруги, необхідної для підтримки такого струму. Якщо запровадити поняття диференціального опору, як похідну по струму від напруги, то у цьому випадку виникає нове явище – негативний диференціальний опір. Нагадаємо, що для провідників, що підкоряються закону Ома, наприклад, металів, диференціальний опір просто дорівнює звичайному опору і завжди позитивний.

Будемо й надалі характеризувати електричні властивості газового проміжку між двома поміщеними в газ електродами, вольт-амперною характеристикою (ВАХ). Так прийнято робити завжди у разі нелінійної залежності струму через провідний елемент від прикладеної напруги.

Експериментально ВАХ газового провідника – наприклад, проміжок між двома електродами, поміщеними у скляну трубку, заповнену газом, – знімають за допомогою схеми, представленої на Рисунку 1.4.

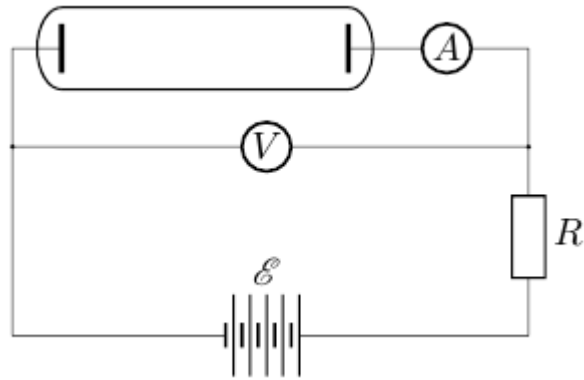


Рисунок 1.4 – Схема для зняття ВАХ газового проміжку [46]

Коло містить джерело постійної напруги ε , величину якої можна змінювати в межах приблизно від 100 до декількох килівольт, і змінний опір R , що називається баластним, або навантажувальним. Цей опір необхідний для обмеження струму в колі і стабілізації розряду на ділянках з негативним диференціальним опором. Справа в тому, що на цих ділянках розряд нестійкий і струм має тенденцію необмежено зростати. Для стійкості розряду сума негативного і позитивного опорів такого кола повинна бути позитивною, тобто в точці перетину з ВАХ навантажувальної прямої повинна мати більший нахил, ніж ділянка кривої ВАХ. Коло містить також прилад для вимірювання струму A і вольтметр V , що вимірює напругу U між електродами.

За допомогою схеми на Рисунку 1.4 можна отримати будь-який можливий режим протікання струму через газовий провідник, що досліджується. Справді, на площини (U, I) такий режим визначається точкою перетину ВАХ, тобто кривою $U(I)$, з навантажувальною прямою $U = \varepsilon - RI$. Змінюючи ε і R , можна отримати будь-яку точку ВАХ. При цьому стабільність струму на ділянці ВАХ з негативним нахилом можна забезпечити вибором досить великого опору R [46].

Вплив електричного розряду на хімічні речовини залежить від характеру розряду, який перш за все визначається різницею потенціалів, тиском в області розряду та густиною струму. Розрізняють три основних типи електричного

розряду: тихий, тліючий та дуговий. На Рисунку 1.5 схематично показані області існування цих основних типів розряду.

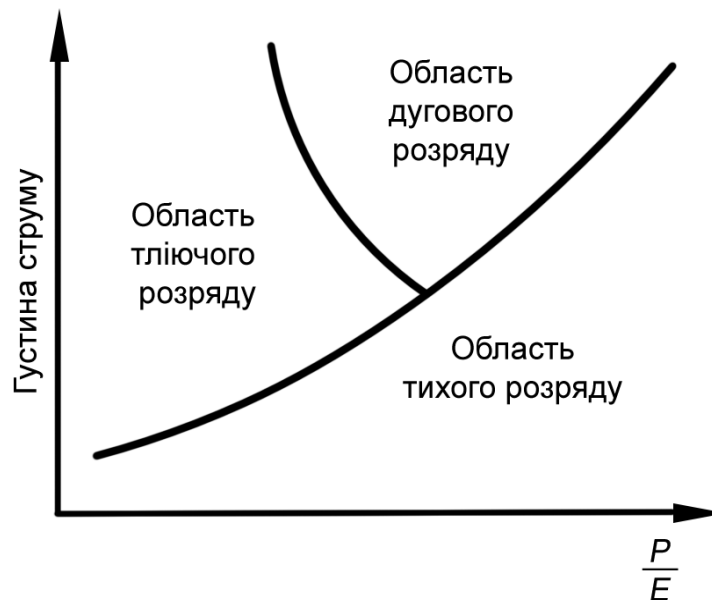


Рисунок 1.5 – Області існування основних типів розрядів. Тут P – тиск газу, E – напруженість електричного поля

Тут на вісі абсцис відкладена величина, що відповідає відношенню тиску у зоні розряду до напруженості електричного поля, а на вісі ординат – густина розрядного струму. При зміні цих параметрів один тип розряду може переходити в інший [47].

1.4.1 Тихий розряд. Іскровий розряд

Тихий розряд, який зазвичай спостерігається при тисках, порівнянних з атмосферними, та відносно великих різницях потенціалів між електродами, представляє собою самостійний розряд, зумовлений провідністю газу за рахунок його залишкової іонізації. Відповідно до цього тихий розряд характеризується малою густиною струму та пов'язаною з цим відсутністю впливу об'ємних зарядів.

При збільшенні різниці потенціалів густина струму зростає, і при певній різниці потенціалів виникає особлива форма тихого розряду, яку називають коронним розрядом. Коронний розряд особливо легко виникає при неоднорідному електричному полі, наприклад, викликаному великою кривизною поверхні одного (або обох) електродів. У цьому випадку в області максимальної неоднорідності поля, тобто близько до електрода з малою кривизною, спостерігається шар, що світиться, який називається коронним шаром, або короною. В короні відбувається ударна іонізація газу, що визначає самостійний характер коронного розряду та відсутня в області розряду, розташованої поза короною (зовнішня область коронного розряду). При коронуванні лише одного електрода до зовнішньої області розряду потрапляють лише іони одного знака, і провідність її є однополярною. Сила струму в коронному розряді визначається різницею потенціалів, прикладеною до електродів. Оцінка енергії позитивних іонів в короні дає значення приблизно 100 еВ [48].

При достатньо великому струмі коронний розряд переходить в іскровий розряд. Основна особливість останнього полягає в його переривчастості, навіть у випадках, коли розряд живиться постійною напругою. Причина переривчастості іскрового розряду полягає в тому, що після його виникнення опір розрядного проміжку різко знижується, що призводить до перерозподілу потенціалу, що в свою чергу призводить до зменшення різниці потенціалів між електродами, яка стає недостатньою для підтримки розряду. Розряд згасає, але разом із завершенням розряду напруга між електродами починає знову зростати, що призводить до виникнення іскрового розряду, коли напруга досягає значення, достатнього для пробію розрядного проміжку (пробивна напруга). Далі ця картинка періодично повторюється.

Завдяки великим тискам і низьким температурам тихий та коронний розряди виявляються особливо сприятливими для здійснення хімічних реакцій полімеризації або взагалі процесів, в яких продукти реакції мають велику

молекулярну масу порівняно з вихідними речовинами. Простою реакцією такого роду є утворення озону. Технічний спосіб отримання озону базується на застосуванні тихого розряду, який здійснюється в спеціальних розрядних трубках, відомих як озонатори.

Завдяки високим напругам і великій густині струму в іскровому каналі конденсованої іскри цей вид розряду особливо підходить для виконання процесів глибокого розщеплення молекул, пов'язаних із витратою великих порцій енергії. Наприклад, конденсований розряд надає особливо великі виходи атомарного азоту, який утворюється внаслідок розщеплення молекул N_2 , які вважаються одними з найстійкіших молекул [47].

1.4.2 Дуговий розряд

Зі збільшенням густини струму температура електродів зростає, і ТР поступово переходить в дуговий розряд (ДР). Через інтенсивне випаровування металу з розжарених електродів в спектрі ДР переважають лінії металу електродів, які мають порівняно низьку інтенсивність у спектрі ТР.

Одночасно зі збільшенням густини струму зменшується різниця потенціалів між електродами. У виниклій дузі ця різниця потенціалів зазвичай становить лише декілька десятків вольт (для підтримання ТР потрібна різниця потенціалів у декілька сотень чи тисяч вольт). Велика густина струму і низька напруга – основні характеристики електричної дуги постійного струму. Дуги можуть горіти як при низьких, так і при високих тисках. Прикладом дуги низького тиску може служити ртутна дуга, яка горить між металевими (зокрема, ртутними) електродами в атмосфері ртутних парів; прикладом дуги, що горить при атмосферному тиску, є звичайна вугільна дуга або дуга з металевими електродами. Також існують дуги, які горять при тисках, значно вищих за атмосферний.

Через низьку напругу в ДР електрони мають порівняно невеликі швидкості. Тому у спектрі дуги переважають лінії і полоси, які належать нейтральним атомам і молекулам. Такі спектри, які випромінюються нейтральними частинками, часто називають дуговими спектрами, на відміну від іскрових спектрів, які переважають у випромінюванні електричних іскор і які випромінюються іонами.

Зазвичай ми маємо справу з розрядами з розжареним катодом, температура якого становить кілька тисяч градусів. Найбільш нагрітою частиною катода є катодна пляма. Підвищена емісія електронів з катода є однією з умов існування електричної дуги. Але існують розряди з холодними електродами (наприклад, ртутний розряд). В цьому випадку ДР підтримується автоелектронною емісією катода, що обумовлена тунельним проходженням електронів через потенціальний бар'єр, утворений подвійним електричним шаром на поверхні катода. Не виключена також можливість, що джерелом електричних зарядів у дузі з холодними електродами, який горить при високому тиску, є термічна іонізація нагрітого газу навколо катода.

Стан газу в ДР, як правило, відповідає стану ізотермічної плазми. Завдяки високій температурі газу та високій "електронній температурі", яка досягає кількох тисяч градусів, великій густині струму і зазвичай високому тиску, у дузі переважають хімічні процеси, характерні для високих температур, зокрема процеси високотемпературного крекінгу та ендотермічні процеси [47].

До класу приладів з несамоствійним ДР належать прилади з накаленим катодом. Найпростішим видом таких приладів є газотрон – двохелектродний прилад, заповнений інертним газом, воднем або паром ртуті. Розряд у газотроні є несамоствійним, оскільки енергія для емісії електронів надається катоду ззовні. Газотрон має властивості випрямляча завдяки високій провідності при прямій напрузі та великому внутрішньому опорі при зворотній.

До приладів з самоствійним ДР належать передусім ртутні вентиля. Дуга у вентиля горить в парах ртуті, які заповнюють оболонку приладу при

випаровуванні матеріалу катода. Напруга горіння розряду у вентилі становить 20-30 В і не залежить від струму розряду. Ртутні вентилі використовуються для випрямлення та інвертування змінного струму. Важливими параметрами вентилів є допустима зворотна напруга та зворотний струм [42].

Ось ще декілька прикладів пристроїв та систем, які використовують ДР:

- Електричні дугові печі. Вони використовуються для плавлення і обробки металів. ДР утворюється між електродами і розплавляє матеріал, який потім може бути легко виформований.
- Електричні дугові зварювальні машини. Вони використовуються для з'єднання металевих деталей. ДР нагріває поверхню металу і дозволяє його з'єднати.
- Лампи розряду високого тиску. Ці лампи використовують ДР у газовому середовищі для створення світла. Вони використовуються у вуличному освітленні, на спортивних майданчиках і у промислових приміщеннях.
- Діодні лампи. Ці лампи використовуються у сучасній освітлювальній техніці та медичному обладнанні. Вони створюють світло за допомогою ДР в напівпровідниковому матеріалі.
- Газорозрядні іонізатори. Вони використовуються для очищення повітря в системах кондиціонування та очищення повітря в приміщеннях. ДР утворює іони, які здатні зв'язувати інші частинки у повітрі.

1.4.3 Тліючий розряд

Тліючий розряд (ТР) є складним фізичним явищем, яке виникає при збуренні газу електричним полем. Цей вид розряду характеризується тим, що він утримується на певному рівні напруги, при якому інтенсивність іонізації газу стає достатньою для утримання електричного розряду.

Характеристики ТР визначаються рядом факторів, включаючи газовий склад, тиск, температуру, та форму електродів. Важливим аспектом є також наявність ініціатора розряду, який може бути викликаний різними електричними або фізичними методами.

ТР використовується в різних типах приладів:

- Двоелектродні світлові індикатори.
- Стабілітрони.
- Двоелектродні високовольтні вентилі.
- Тиратрони для різних застосувань.
- Перемикаючі світлові індикатори.
- Прилади для десятичного лічіння та комутатори.
- Розрядники.
- Газорозрядні лампи ТР з позитивним стовпом.
- Газорозрядні пристрої для відображення інформації.
- Газорозрядні оптичні квантові генератори (лазери) [42].

Так як ТР є об'єктом дослідження, що проводиться в цієї роботі, розглянемо його властивості більш детально в наступному розділі.

Висновки до Розділу 1

1. Над вивченням явища газових розрядів працювало багато вчених. Особливо великі внески в розвиток сучасних теоретичних знань про розряди зробили Дж. Дж. Томсон, його учень Дж. С. Таунсенд, а також І. Ленгмюр, який ввів поняття плазми.
2. Основні елементарні процеси, що відбуваються в плазмі розряду – це збудження, іонізація, рекомбінація та дисоціація молекул. Іонізація являє собою крайній випадок збудження.
3. Першу теорію переходу несамостійного газового розряду в самостійний запропонував Таунсенд. Ця теорія добре узгоджується з експериментально отриманим законом Пашена. Згідно закону Пашена, потенціал запалення U_3 залежить від добутку тиску p і довжини d розрядного проміжку, і має свій мінімум.
4. Електричне коло з газорозрядною камерою має містити у собі змінний опір R , який називається баластним або навантажувальним. Для стабілізації струму у колі баластний опір має бути достатньо великим.
5. Основні типи газового розряду – це тихий, тліючий і дуговий розряди. Кожен з них знаходить застосування в техніці та повсякденному житті.

РОЗДІЛ 2 ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД В КОАКСИАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОДІВ В АЗОТІ

2.1 Основні властивості тліючого розряду

Тліючий розряд (ТР) зазвичай спостерігається при тиску в декілька десятків торр і нижче, хоча за певних умов (зокрема, при охолодженні катода) цей тип розряду можна отримати і при атмосферному тиску.

Для ТР характерний своєрідний розподіл світіння в проміжку між електродами, який відображає відповідний розподіл потенціалу. На Рисунку 2.1 представлено вигляд ТР у розрідженому повітрі [49], а на Рисунку 2.2 – якісну картину ТР у довгій скляній трубці, а також наведено залежності основних величин, що характеризують розряд, від поздовжньої координати. Це інтенсивність світіння, потенціал та напруженість електричного поля, електронний та іонний струми, електронна та іонна густини і повна густина об'ємного заряду.

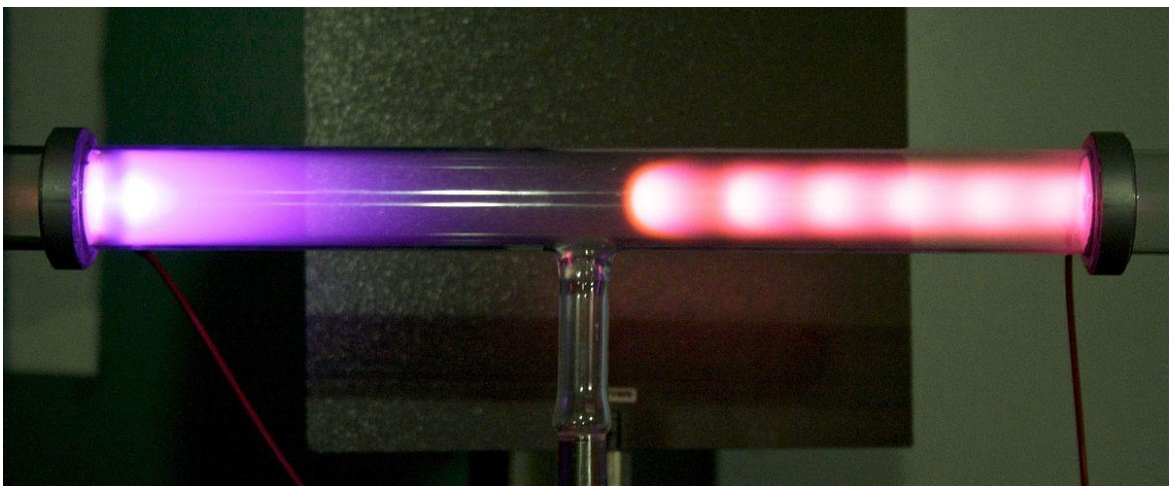


Рисунок 2.1 – Вигляд ТР в розрідженому повітрі [49]

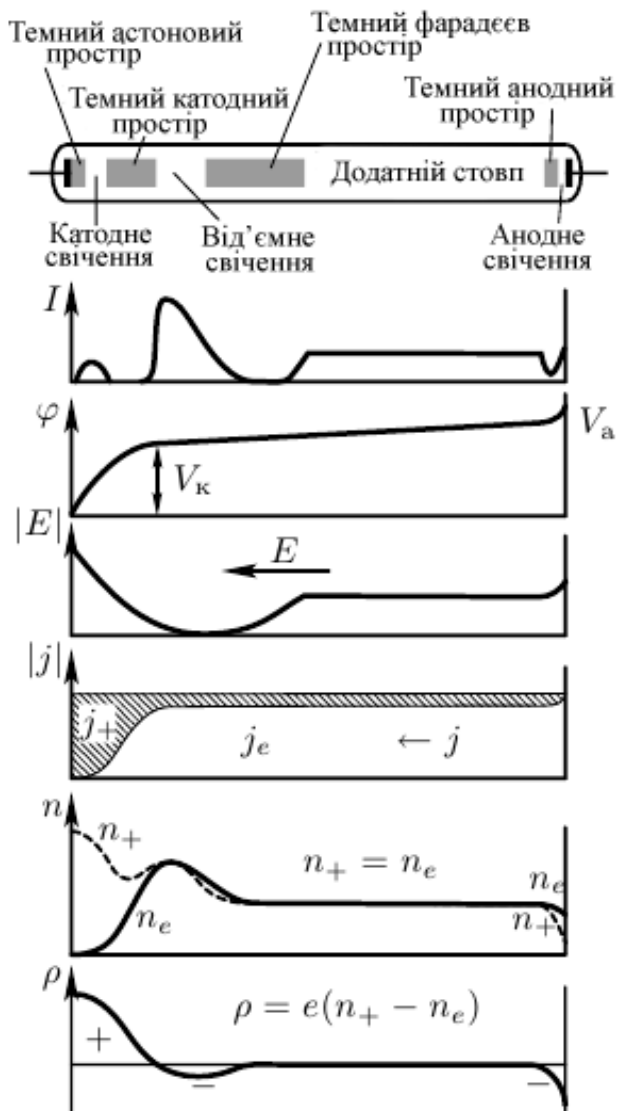


Рисунок 2.2 – Структура ТР та розподіл по довжині основних величин, що його характеризують [45]

Зазвичай найяскравішою є область від'ємного свічення, яке має для повітря блакитнуватий колір, за що розряд і отримав свою назву – тліючий. Кольори ТР в інших газах наведено у Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Кольори світіння тліючого розряду деяких газів

Газ	Колір	Примітка
Гелій	Біло-помаранчевий, але в деяких умовах може мати сірий або блакитний відтінок	Використовується художниками для спеціального освітлення
Неон	Червоно-помаранчевий	Яскраве свічення. Використовується у неонових рекламних вивісках і лампах
Аргон	Фіолетово-блакитний	Часто застосовується разом з розрядом в парі ртуті
Кріптон	Сіруватий, у розрядах високої напруги (РВН) може бути блакитним	Використовується художниками для спеціального освітлення
Ксенон	Сіруватий, в РВН може бути зелено-синім	Використовується у ксенонових фотоспалахах, лампах підсвітки індикаторів, ксенонових дугових лампах, а також художниками для спеціального освітлення
Радон	Синій	Не може бути використаним через відсутність стабільних ізотопів
Азот	Аналогічно до аргону, більш тьмяний з відтінком рожевого. У РВН біло-синій.	
Кисень	Блідий фіолетовий	
Водень	Блідий ліловий в розрядах низької напруги, рожево-червоний при струмах більше 10 мА.	
Водяна пара	Аналогічно до водню, але менш яскраве свічення	
Диоксид азоту	Слабкий біло-синій	
Пари ртуті	Світло-блакитний з інтенсивним УФ-випромінюванням	У поєднанні з люмінофорами використовується для отримання світла різних кольорів. Також використовується у ртутних газорозрядних лампах
Пари натрію	Яскраво-жовтий	Широко використовується в натрієвих газорозрядних лампах вуличного освітлення

Класична схема втілення ТР зображена на Рисунку 2.3.

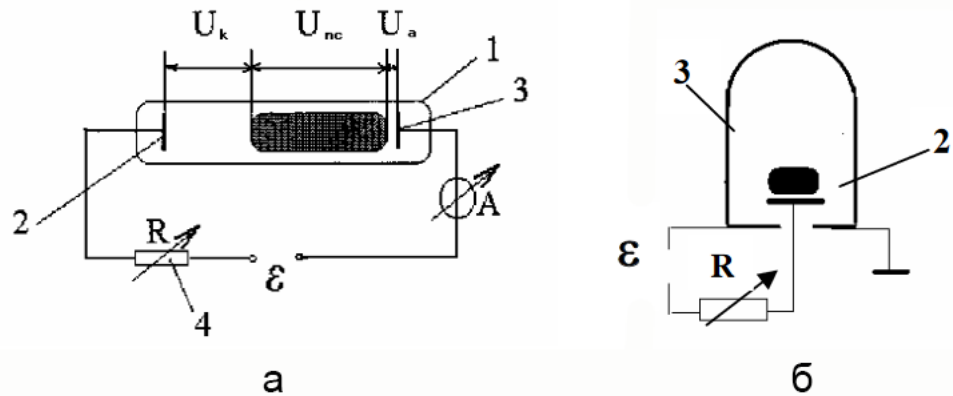


Рисунок 2.3 – Схеми реалізації ТР: а – в скляній трубці (класична схема); б – в камері технологічної установки

На Рисунку 2.3б в якості анода використовується металева камера (знімний колпак) плазмо-технологічного обладнання. Колпак може бути і скляним, у такому випадку анодом може бути сітка або електрод, введений в камеру. Установки останнього типу широко використовуються для плазмового нанесення покриттів, травлення та інших цілей [50].

Схема на Рисунку 2.3а використовується для дослідження ТР. Баллон 1 можна вакуумувати, а потім заповнити обраним газом до заданого тиску. Зазвичай у розряді спостерігаються три візуально відмінні області:

- а) прикатодна область, де напруга U_k зазвичай становить 200-700 В;
- б) додатній стовп;
- в) прианодний шар.

Додатній стовп в фізиці тліючого розряду – пасивний елемент: наближаючи анод і катод один до одного, можна ліквідувати додатній стовп, і розряд буде горіти. У техніці, навпаки, додатній стовп – корисний елемент: він світиться в рекламних трубках, є активним середовищем у газових лазерах, напруга на ньому визначається саме технічними вимогами, наприклад, довжиною рекламних трубок. Прианодний шар зазвичай дуже тонкий,

складається з "плівки", що світиться, та тонкої темної ділянки. Довго вважалося, що він також "пасивний", проте зараз доведено, що деякі нестабільності безпосередньо пов'язані з ним. Падіння напруги на анодному шарі U_a невелике (10-20 В) і, як правило, близьке до потенціалу іонізації газу.

Прикатодна область є фізично найважливішим елементом ТР: саме тут утворюється електронна лавина. У певному газі при певному тиску формується довжина прикатодної області d_k , яка дорівнює кільком довжинам іонізації. Як було зазначено раніше, сформована довжина d_k обернено пропорційна тиску p так, щоб величина pd_k відповідала мінімальному значенню U_K . Основною характерною особливістю ТР є велике падіння потенціалу в прикатодній області U_K – сотні вольт. З катодного шару в додатній стовп виходить певна кількість електронів з енергією, достатньою для іонізації атомів (молекул) в стовпі для компенсації втрачених електронів, тобто U_K повинно бути значно більше потенціалу іонізації атомів газу. Катодна область якби "приклеєна" до поверхні катода. Якщо провідною є лише одна його поверхня, то при будь-якому повороті катода розряд приходиться лише на неї – навіть якщо повернути її на 180° , якби спиною до анода.

Свічення катодної області має "шарувату" структуру (Рисунок 2.1). Прямо під катодом розташована темний "астроновий простір", пов'язаний з тим, що електрони, виходячи з катода, ще не набрали достатньої енергії для збудження атомів та молекул газу. Далі розташована область катодного свічення, де відбувається інтенсивне збудження різних рівнів. Катодний темний простір виникає там, де енергія прискорених електронів перевищує значення в максимумі функції збудження, поперечні секції збудження зменшуються, кількість збуджених атомів зменшується. Далі електрони переважно іонізують атоми, відбувається лавинне розмноження електронів, які, прискорюючись, знову викликають збудження атомів. З'являється "тліюче від'ємне свічення". У плазмі розряду електричне поле різко падає, електрони, витрачаючи свою

енергію, не набирають в слабкому полі достатньої енергії для збудження атомів, виникає темний "фарадеевий простір".

У зоні тліючого свічення ($p \approx 0$) плазма найбільш ідеальна. Оскільки електричне поле $E \approx 0$, електрони переходять з зони тліючого свічення в фарадеевий простір головним чином за рахунок дифузії. Іони також потрапляють в прикатодну область за рахунок дифузії. Прискорені до катода іони вибивають вторинні електрони. Темний фарадеевий простір – це перехідна область, в якій немає іонізації та збудження. З наближенням до додатного стовпу безладний тепловий рух електронів все більше переважає над спрямованим рухом.

Опис усіх процесів, які пояснюють цю "шаруватість" (і деякі більш тонкі ефекти), залишається далеко не повним. Також незрозуміле і ще одно явище: площа струмової плями S на катоді в нормальному режимі завжди визначається співвідношенням

$$S = \frac{I}{j}, \quad (2.1)$$

де: I – загальний струм, а j – деяка "нормальна густина струму", постійна для даного розряду. Ця важлива властивість ТР відома як закон нормальної густини струму. При збільшенні I (наприклад, при зменшенні зовнішнього опору R або підвищенні ЕРС джерела ε) S зростає пропорційно струму до тих пір, поки струмова пляма не займе всю провідну поверхню катода. При цьому катодне падіння напруги U_K залишається постійним. Подальше збільшення I призводить до зростання U_K – це "аномальний режим" з аномальним катодним падінням потенціалу, і сам розряд переходить до аномального ТР. Чому $j = \text{const}$ залишається невідомим.

Якщо в показаній на Рисунку 2.3 установці збільшувати струм, то в якийсь момент спалахне розряд, причому між катодною областю та анодом з'явиться світіння з характерним для даного газу спектром випромінювання

(Таблиця 2.1) і займатиме весь переріз трубки. Це і є додатній стовп, причому на ньому буде падіння напруги

$$U_{\text{дс}} = \varepsilon - IR - U_K - U_A. \quad (2.2)$$

Це єдина область розряду, яка може бути довільної довжини. Додатній стовп представляє собою плазму з концентрацією частинок, яка зменшується від осі до стінок, в ньому відбувається інтенсивний процес іонізації та втрати частинок на стінки. При цьому додатній стовп практично не дозволяє іонам проникати в катодну область. Виходячи на стінки, електрони заряджають їх від'ємно відносно центральної області близької до осі, і іони прискорюються до стінки, тобто відбувається амбіполярна дифузія. У кінцевому підсумку електрони та іони на стінках рекомбінують.

Процес утворення додатного стовпа досить складний, хоча його "призначення" – з'єднати катодний і анодний шари. Стовп електрично нейтральний, тому що густини електронів і іонів (однозарядних) однакові, а струми, відповідно, суттєво розрізняються. Температура основної маси електронів $T_e = 1-2$ еВ, а іонів T_p – практично дорівнює температурі стінок (іони швидко обмінюються поступальною енергією з газом), так що додатній стовп термодинамічно дуже нерівноважний [51].

Зближуючи катод і анод, можна ліквідувати додатній стовп, але розряд буде горіти. Більше того, анодним шаром можна пройти темний фарадеевий простір, але як тільки він торкнеться до катодного шару – від'ємне тліюче свічення розряду погасне. Недавно було доведено, що свічення стовпа підтримують відносно швидкі електрони (20-30 еВ), які прискорюються в катодній області і потрапляють з катодного стовпа в кількості, яка саме достатня для компенсації втрат електронів в ньому і забезпечення збудження газу. У рекламних трубках додатній стовп слідує за всіма їх згинами, що пояснюється утворенням поверхневих зарядів на внутрішніх стінках трубок і

появою відповідних поперечних електричних полів. Якщо збільшувати тиск, то відбувається стискання додатного шнура, температура і провідність зростають, струм зростає, викликаючи додаткове розігрівання. В результаті росту температури може початися термічна іонізація, і ТР може перейти в дуговий режим.

Анодний шар завжди дуже тонкий. Електрони прискорюються до аноду і іонізують газ. Якщо струм на аноді $I_A = \frac{1}{4} n_e e \bar{v}_e S$ більше розрядного струму в колі ($I_A > I$), то анод заряджається від'ємно відносно додатного стовпа; в іншому випадку ($I_A < I$) – позитивно. Слід відзначити, що в лазерних середовищах (при великих p і j) при збільшенні тиску зростає анодне падіння потенціалу, але залишається нормальна густина струму, порівнянна з нормальною густиною струму катода [52].

2.2 Тліючий розряд в азоті

Молекулярний азот широко використовується в різноманітних плазмохімічних технологічних процесах, а також як невелика домішка до різних газів для визначення параметрів плазми газового розряду.

Плазма ТР в азоті є сильно нерівноважним слабкоіонізованим газом. Факторами нерівноважності, що впливають на характер кінетики процесів у плазмі розряду, є порушення рівноваги між коливальними, обертальними та поступальними ступенями свободи молекул, а також відхилення функції розподілу електронів за енергією (ФРЕЕ) від розподілу Максвелла [53, 54].

Уповільнена коливальна релаксація молекул азоту в розряді зумовлює високий рівень коливального збудження молекул. При цьому заселення коливальних рівнів молекул не описується формулою Больцмана [16]. Це значно ускладнює експериментальні та теоретичні дослідження динаміки нагрівання газу, формування ФРЕЕ та функції розподілу молекул за коливально-обертальними рівнями енергії.

Низькотемпературний ТР в аномальному режимі широко використовується на практиці, наприклад, в технології азотування металевих поверхонь [55, 56]. Протягом досить тривалого часу не існувало загальноприйнятих уявлень щодо фізики дифузійного насичення металу азотом в цих умовах. Останнім часом було неодноразово відзначено, що ключову роль у цьому процесі відіграє атомний азот, зокрема, у метастабільному стані [57, 58]. У цьому випадку суттєві переваги для технології плазмового азотування повинні надавати суміші, що формують плазму на основі азоту з домішками аргону, де атомний азот може бути ефективно згенерований [59]. Теорія ТР також була широко розроблена, особливо в напрямку врахування так званих нелокальних ефектів в області розряду поблизу катода [60, 61]. Загалом плазма ТР сильно нерівноважна, і строгий аналіз виробництва атомного азоту в цьому

середовищі представляє собою складну задачу. З іншого боку, пряме експериментальне визначення густини N_A цього атомного компонента в плазмі ТР також є складною задачею, оскільки воно вимагає використання вакуумних спектроскопічних технік [62].

ТР в азоті широко використовується при азотуванні сталей. Це ефективна технологія модифікації поверхні металів, яка дозволяє змінювати властивості поверхневих шарів (твердість, товщина, фазовий склад, градієнт властивостей вздовж товщини) в широких межах. Це має велике значення для підвищення експлуатаційних характеристик конструкційних елементів [63, 64]. Перспективними є технологія та обладнання для хіміко-термічної обробки деталей машин та інструментів в ТР в безводневих середовищах (суміш азоту з аргоном) [65, 66]. Особливість цієї технології полягає в уникненні водневого охрупчення металів під час дифузійного насичення та підвищенні пластичних властивостей поверхневих шарів за рахунок різниці фаз [67].

Властивості азотованого шару характеризуються чотирма технологічними параметрами: температурою дифузійного насичення, тиском у вакуумній камері, складом насичуючого середовища та часом азотування. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що всі ці технологічні параметри процесу азотування впливають на властивості азотованого шару. Для забезпечення максимальної стійкості до зносу пар тертя у абразивному середовищі необхідно, щоб поверхневі шари мали високу твердість і максимальну товщину. Крім того, дослідження показують, що на стійкість до зносу сталей в абразивному середовищі значний вплив мають метастабільні фази в структурі матеріалу.

Також техніку азотування застосовують для титанових сплавів. Одним із найефективніших засобів підвищення експлуатаційних властивостей титанових сплавів є використання деталей із спеціальними властивостями поверхневого шару, модифікованого різними методами. В даний час для підвищення поверхневої твердості, стійкості до зносу та корозійної стійкості титанових

сплавів використовується метод дифузійного насичення азотом в плазмі газових розрядів [68-70]. Однак недоліком таких методів є тривалість процесів. Раніше було показано [71], що для ідентифікації азотування сталей необхідно видаляти утворені на оброблюваній поверхні шари оксидів за допомогою іонного травлення. При обробці титану шар нітриду титану, що утворюється на поверхні, також суттєво заважає проникненню азоту вглиб зразку. У цьому випадку збільшення ефективності іонного травлення оброблюваних поверхонь протягом процесу азотування, наприклад, за рахунок зниження тиску робочого газу, також є доцільним. Іншим методом є збільшення концентрації азоту в атомарному стані, що можливо як за рахунок підвищення густини іонного струму, так і за рахунок формування плазмоутворюючої суміші різних газів, наприклад, гелію з азотом.

2.3 Коаксіальна система електродів

ТР в коаксіальній системі електродів (КСЕ) також знаходить застосування в науці та техніці. Одним з найвідоміших застосувань ТР в КСЕ є газорозрядні стабілітрони.

Стабілітрони – це двохелектродні газорозрядні пристрої, призначені для стабілізації напруги. На Рисунку 2.4 показано стабілітрон ТР (а) та коронного розряду (б).

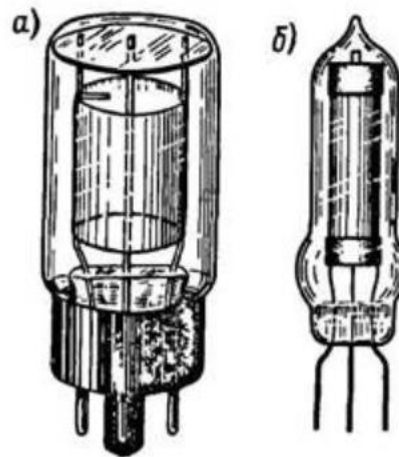


Рисунок 2.4 – Стабілітрони ТР (а) і коронного розряду (б)

Катод стабілітрона виготовлений у формі пустого циліндра з активованою внутрішньою поверхнею. Стержневий анод розташований вздовж осі катода всередині нього, тобто поверхня анода значно менша за поверхню катода. Обидва електроди поміщаються в скляний балон, який наповнюється сумішшю інертних газів (Ne-Ar, He-Ar і ін.), тиск яких змінюється від 10^{-1} до 10^4 Па. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) стабілітрона співпадає з характеристикою нормального ТР (Рисунок 2.5).

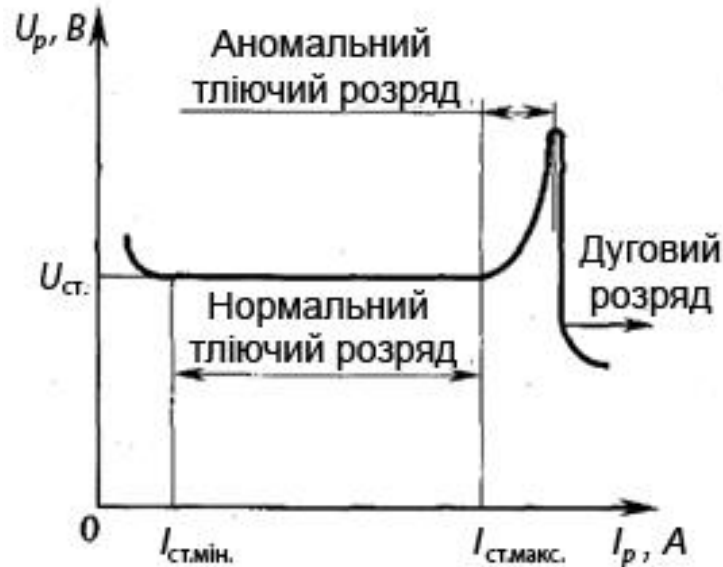


Рисунок 2.5 – ВАХ тліючого розряду

Постійна напруга горіння ТР називається напругою стабілізації ($U_{ст}$ на Рисунку 2.4). Струми, що відповідають ВАХ ТР (максимальний $I_{ст.макс}$ та мінімальний $I_{ст.мін}$), називаються струмами стабілізації.

На сьогоднішній день газорозрядні стабілітрони все частіше замінюються напівпровідниковими стабілітронами.

Також ТР в КСЕ використовується в плазмових прискорювачах. Принцип роботи магнітоплазодинамічного прискорювача з власним магнітним полем полягає в утворенні плазми з протіканням в ній потужного розрядного струму ($I_p \sim 10\text{--}10^3$ кА), що створює сильне власне магнітне поле \vec{B} . При взаємодії взаємоперпендикулярних складових вектора густини струму \vec{j} та вектора магнітної індукції \vec{B} створюється сила Ампера, яка і прискорює плазму. Необхідність отримання високих значень розрядного струму передбачає переважно імпульсний режим роботи таких пристроїв.

Першими плазмовими прискорювачами такого типу були імпульсні коаксіальні плазмові пушки, які представляли собою два циліндричних електрода (внутрішній – катод, зовнішній – анод), підключених до накопичувача енергії. Імпульсне надходження газу в міжелектродний простір і

подальше замикання кола накопичувача призводило до утворення радіального плазмового мосту і протікання через нього розрядного струму. Сила Ампера виникала внаслідок взаємодії радіальної складової струму j_r та азимутального власного магнітного поля.

Характерна схема більш вдосконаленого імпульсного плазмового прискорювача з власним магнітним полем, але вже працюючого в режимі мілісекундних імпульсів, показана на Рисунку 2.6.

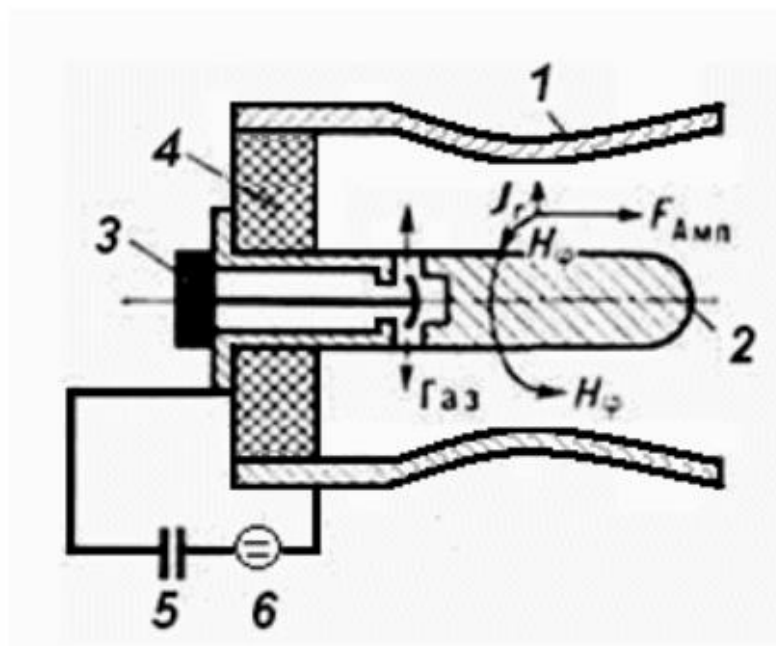


Рисунок 2.6 – Схема квазістаціонарного плазмового прискорювача з власним магнітним полем: 1 – зовнішній електрод; 2 – внутрішній електрод; 3 – клапан; 4 – діелектрична вставка; 5 – накопичувач енергії; 6 – розрядник

Основні елементи прискорювача – профільований зовнішній (1) та циліндричний внутрішній (2) електроди. Подача робочої речовини в міжелектродний простір здійснюється швидкодіючим клапаном 3. Розрядний струм прискорювача досягає 100 кА при розрядній напрузі $U_p = 0,1-1$ кВ та магнітному полі в каналі 0,3-0,5 Тл. Імпульсні плазмові прискорювачі, які працюють на водні, дозволяють отримувати потоки із швидкостями $\sim 10^6$ м/с (10

кеВ/частинку) з загальною енергією, що наближається до мегаджоуля ($\sim 10^{22}$ частинок/імпульс).

Існують коаксіальні плазмові прискорювачі, що працюють в стаціонарному (неперервному) режимі. У цьому випадку напруга між електродами постійна, і робоча речовина постачається неперервно між електродами. Для реалізації в коаксіальному прискорювачі з власним магнітним полем стаціонарного режиму роботи внутрішній електрод (катод) роблять сильно скороченим, а робочу речовину постачають через спеціальні отвори в ньому. Такий прискорювач, отримавший назву "торцевого", працює при значно менших значеннях розрядного струму, ніж у випадку вищезазначених імпульсних плазмових прискорювачів (≤ 10 кА). Прискорення плазми в торцевому прискорювачі також відбувається за рахунок сили Ампера, при цьому швидкість прискорюваних потоків плазми досягає $5 \cdot 10^4$ м/с.

КСЕ знаходить застосування і в галузі модифікації твердих поверхонь. Для забезпечення рівномірності іонної обробки внутрішньої поверхні довгих трубок малого діаметра виявляється неефективним використання ТР з довгим трубчастим порожнім катодом і анодом, розташованим поза трубкою. Це пояснюється недостатнім проникненням електричного поля всередину трубки, що призводить до нерівномірності обробки.

З цієї причини виявляється доцільним використання внутрішнього коаксіального анода. Такий анод підтримує розряд по всій довжині трубки, забезпечуючи однорідність іонної обробки по всій її внутрішній поверхні. Це підходить для вирішення завдань, пов'язаних із забезпеченням якісного обробки трубок малого діаметра в умовах, де однорідність процесу є критично важливою [72].

2.4 Огляд досліджень тліючого розряду

Як вже було згадано раніше [16, 44], ТР постійного струму може горіти в нормальному та аномальному режимах. Нормальний режим спостерігається в діапазоні струмів 10^{-4} – 10^{-1} А, його ВАХ представляє собою пряму, паралельну осі струму. В нормальному режимі лише частина поверхні катода покрита розрядом, зі збільшенням сили струму частина поверхні, зайнята розрядом, зростає, при цьому густина струму залишається постійною. Поверхня катода, покрита світінням, пропорційна силі струму в трубці, так що при збільшенні або зменшенні сили струму густина струму помітно не змінюється. Разом з тим залишається постійним і катодне падіння потенціалу, це катодне падіння називається нормальним катодним падінням. Коли вся поверхня катода покривається світінням, розряд переходить в аномальний режим зі зростаючою ВАХ.

У [44] стверджується, що нормальний режим горіння може спостерігатися лише праворуч від мінімуму кривої запалювання тліючого розряду (тобто при $pd \geq (pd)_{min}$, де d – відстань між електродами, p – тиск газу), а при менших тисках ТР горить тільки в аномальному режимі. Тим часом характеристики катодного шару (катодне падіння напруги U_k , товщина катодного шару d_k , відношення густини струму до квадрата тиску газу j/p^2) ТР низького тиску в аргоні та азоті були виміряні в роботі [73] і отримано, що нормальний режим горіння може спостерігатися лише праворуч від точки згину кривої запалювання ТР. Автори [73] відзначили, що пороговий тиск p_n для появи нормального режиму горіння знаходиться праворуч від точки згину кривої запалювання ТР. Цей висновок вони підтвердили вимірюваннями ВАХ розряду, а також візуальними спостереженнями світіння розряду біля катода. Отриманий в [73] результат пояснюється тим, що перехід з таунсендівського розряду в тліючий відбувається таким чином, що зліва від точки згину перерозподіл

потенціалу (викликане збуренням вакуумного поля E_{DC} , що виникає внаслідок просторового заряду) призводить до ускладнення розмноження електронів, у той час як справа від точки згину розмноження електронів полегшується завдяки перерозподілу потенціалу, і розряд може горіти при менших напругах. Отже, нормальний режим горіння може спостерігатися лише поблизу та праворуч від точки згину. Однак цей висновок теоретично не був підтверджений.

Для параметрів нормального ТР (катодного падіння потенціалу U_n та густини струму j_n) у випадку геометрично подібних трубок, заповнених одним і тим самим газом, при однаковому матеріалі електродів повинні виконуватися наступні закони подібності:

1. $U_n = \text{const}$, не залежить від сили струму нормального ТР та тиску газу;
2. $j_n/p^2 = \text{const}$ (нормальна густина струму, поділена на квадрат тиску газу, є незалежним параметром від величини розрядного струму);
3. добуток тиску газу і довжини прикатодного шару також не залежить від величини розрядного струму $pd_k = \text{const}$ [74, 75].

Після того, як вся поверхня катода виявляється покритою розрядом, спостерігається перехід до аномального режиму горіння, в якому діють інші закони подібності: $U = f_1\left(\frac{j}{p^2}\right)$, $pd = f_2\left(\frac{j}{p^2}\right)$ [44, 75].

У роботі [76] наведено модель, яка описує поведінку величини j/p^2 в залежності від катодного падіння потенціалу. Вард [77] за допомоги чисельного моделювання показав, що існує постійне значення густини струму в нормальному ТР, яке забезпечує оптимальний рівень іонізації в катодному шарі, що може пояснити стійкість значення нормальної напруги, завдяки якій розрядна пляма з ростом струму розширюється на катоді. Однак в нормальному ТР можуть спостерігатися відхилення від законів подібності [78-80].

В деяких роботах експериментально та за допомогою чисельного моделювання досліджувалася поведінка параметра нормального катодного падіння напруги U_n [81-85].

Є ряд робіт, присвячених вивченню радіальної структури нормального режиму постійного струму [86-92]. Авторами [88] було показано, що стабільність розряду, який горить в нормальному режимі, може бути пояснена наявністю радіального електричного поля на межі плазма-шар, завдяки якому електрони утримуються в плазмовому стовпі. Для вивчення самостійних розрядів Боуф [89] розробив двовимірну модель, яка добре відображає характерні риси нормального режиму та перехід від нормального до аномального режиму горіння ТР постійного струму, враховуючи вплив радіального електричного поля. Радіальне електричне поле, яке утворюється на межі плазма-шар, виштовхує електрони в напрямку до центру негативного світіння ТР, а іони – від центру.

Декілька робіт присвячено вивченню умов виникнення нормального режиму постійного струму [73, 93-96]. У роботі [93] аналітично показано, що на правій гілці кривої Пашена праворуч від точки згину відносно невелике збурення однорідності поля, обумовлене просторовим зарядом, призводить до спадної ВАХ таунсендівського розряду і, як наслідок, до його нестійкості. Наслідком цього є утворення шнура розряду та встановлення нормальної густини струму, при якій розряд займає лише частину поверхні катода. У роботі [94] побудовано математичну модель, за допомогою якої отримані ВАХ, що описують різні форми горіння ТР постійного струму. Оглядова робота [96] присвячена узагальненню результатів моделювання газових розрядів низького тиску і, зокрема, вивченню нормального режиму постійного струму.

У більшості робіт ТР запалювався між плоскими паралельними електродами рівної площі, які займали весь поперечний переріз розрядної трубки.

У роботі [97] досліджено вплив діаметра електродів (55 мм, 25 мм, 12 мм, 5 мм, 2,4 мм і 0,8 мм) на запалення розряду в азоті та його режими горіння при відстані між електродами 25 мм. Виявлено, що зменшення діаметра електродів при великих тисках газу призвело до запалення розряду при менших напругах, ніж для великих електродів, а в діапазоні низьких тисків – до зміщення кривих запалювання в область вищих пробійних напруг. Виявлено, що всі виміряні ними криві запалювання перетинаються при тиску азоту $p \approx 0,9$ Торр, близькому до точки згину на кривих запалювання для великих електродів. Зліва від точки згину спотворення однорідного розподілу електричного поля між електродами малого діаметра ускладнює процес іонізаційного розмноження в розрядному проміжку, і пробійна напруга зростає, а справа від точки згину внаслідок перерозподілу електричного поля полегшуються умови для пробією газу.

Проте в літературі мало даних, які вказують на вплив геометрії коаксіальних електродів на параметри плазми ТР. У зв'язку з цим метою даної роботи є вивчення впливу розмірів катода та анода, а також відстані між ними на запалювання та ВАХ ТР.

Висновки до Розділу 2

1. Катодний шар – найважливіша частина ТР, без нього розряд не може існувати. Товщина кожного шару і величина катодного падіння потенціалу автоматично встановлюються таким чином, щоб виконувались критерії самопідтримування розряду при мінімумі затрат енергії: це – мінімальна для такого розміру напруга, яка приблизно дорівнює мінімальній напрузі запалювання за кривою Пашена.
2. Молекулярний азот широко використовується у плазмохімічних технологіях та як домішка для визначення параметрів газового розряду. Тліючий розряд в азоті, зокрема в аномальному режимі, широко використовується в технології азотування металевих поверхонь, зокрема, для титанових сплавів, при цьому значний вплив на властивості азотованого шару мають технологічні параметри процесу. Загалом, дослідження в цьому напрямку важливі для покращення якості та ефективності плазмових технологій в різноманітних галузях.
3. ТР в КСЕ має різноманітні застосування в науці та техніці. Одним з ключових використань ТР в КСЕ є створення газорозрядних стабілітронів. Крім того, КСЕ використовується в плазмових прискорювачах, зокрема, у магнітоплазмодинамічних пристроях та у технології модифікації твердих поверхонь. ТР в КСЕ відкриває широкий спектр можливостей у сучасних наукових та технічних застосуваннях.
4. Існує багато досліджень впливу геометрії електродів на характеристики ТР, однак досі КСЕ в літературі вивчена достатньо мало, що робить дослідження даної роботи актуальними і важливими.

РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ У КОАКСІАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОДІВ

3.1 Комп'ютерне моделювання як інструмент досліджень

Фізика, як наука, вивчає природу та основні закони її функціонування. У сучасному науковому світі, де дослідження здійснюються на різних рівнях складності, комп'ютерне моделювання стає невід'ємною складовою фізичних досліджень. Ця техніка відіграє ключову роль у вивченні явищ різної природи, починаючи від наноструктур і закінчуючи космічним простором.

Комп'ютерне моделювання у фізиці використовує математичні моделі та алгоритми для відтворення фізичних явищ. Це дозволяє дослідникам аналізувати та прогнозувати поведінку систем, які можуть бути важко або навіть неможливо вивчити експериментально. Моделі можуть охоплювати широкий спектр від молекулярних та атомних рівнів до великих астрофізичних об'єктів.

В нанофізиці та матеріалознавстві комп'ютерне моделювання грає критичну роль у вивченні властивостей матеріалів на молекулярному рівні. Методи молекулярної динаміки та квантової механіки дозволяють відтворювати рух частинок та електронну структуру матеріалів. Наприклад, використовуючи моделювання наночастинок, дослідники можуть визначити їхні властивості для розробки нових матеріалів з певними функціоналами.

Квантове комп'ютерне моделювання дозволяє дослідникам розглядати квантові ефекти, які важко або неможливо відтворити класичними методами. Застосування квантової хімії допомагає визначати енергетичні рівні та хімічні властивості молекул, що є критичним для фармацевтичної та каталітичної промисловості.

У вивченні космосу, де експериментальні дані обмежені, комп'ютерне моделювання грає ключову роль. Воно дозволяє відтворювати розвиток

галактик, формування планет та галактичних структур. Моделювання космічних явищ допомагає переглядати космічні та часові масштаби, недосяжні експериментам на Землі.

Складні системи, такі як плазма, аерозолі та рідини, вимагають специфічних методів моделювання. Симуляція квазічастинкових моделей дозволяє аналізувати велику кількість частинок, враховуючи їхню взаємодію та динаміку. Це важливо для розуміння явищ, таких як фазові переходи та поведінка плазми в різних умовах.

Конкретний приклад застосування комп'ютерного моделювання у фізиці - вивчення впливу геометрії коаксіальних електродів на розряди в азоті. Сучасні пакети для газорозрядних симуляцій дозволяють розглядати велику кількість параметрів, таких як тиск, температура та геометрія електродів, для аналізу їх впливу на характеристики тліючого розряду.

Методологія комп'ютерного моделювання визначає процес та підходи до створення, валідації та використання комп'ютерних моделей для вирішення наукових проблем. При використанні комп'ютерного моделювання, як інструменту досліджень, умовно можна виділити наступні кроки:

1. На першому етапі роботи над комп'ютерною моделлю визначається мета та завдання, які необхідно вирішити. Розробник повинен чітко розуміти, які аспекти реального світу він планує відтворити в моделі та які параметри він прагне дослідити.
2. Після постановки задачі необхідно вибрати математичні методи, що будуть використані для опису системи в моделі. Це може включати в себе різні диференціальні рівняння, стохастичні моделі, різноманітні алгоритми оптимізації та інші математичні концепції, залежно від характеру досліджуваної системи.
3. Розробка структури моделі. На цьому етапі концептуальна модель перетворюється в структуровану форму. Визначаються компоненти моделі, їх взаємозв'язки та взаємодії. Часто використовуються блок-

схеми, схеми потоку даних або інші графічні засоби для подання структури моделі.

4. Після розробки структури моделі переходять до її безпосередньої реалізації в комп'ютерному середовищі. Важливо враховувати оптимізацію та ефективність програмного забезпечення для швидкого виконання обчислень.
5. Після завершення реалізації моделі проводять валідацію, яка включає в себе порівняння результатів моделювання з експериментальними даними або вже відомими теоретичними результатами. У випадку необхідності вносять корективи та калібрують модель.
6. Завершальний етап полягає у використанні отриманих результатів для відповіді на початкові наукові питання. Це може включати аналіз впливу різних параметрів на систему, передбачення поведінки системи у різних умовах та інші наукові висновки.

Доречність використання моделювання залежить від конкретних завдань, рівня складності системи та доступності експериментів. Нижче розглянемо кілька випадків, в яких використання моделювання виявляється особливо доречним.

- Одним із ключових випадків, коли моделювання набуває великої доречності, є вивчення систем, що характеризуються великою складністю або об'єктивними обмеженнями для експериментів. Наприклад, в космосі чи на молекулярному рівні, де фізичний доступ обмежений, моделі можуть відтворювати умови, які неможливо або вкрай важко створити експериментально.
- Експерименти в екстремальних умовах, таких як високі температури, тиск чи радіаційне випромінювання, можуть бути небезпечними та вартісними. В таких випадках, моделі можуть забезпечити безпечний та ефективний спосіб вивчення цих умов,

дозволяючи дослідникам експериментувати в віртуальному середовищі.

- У сучасному світі великі дані та комплексні системи стають невід'ємною частиною наукових досліджень. Моделювання дозволяє аналізувати великі обсяги інформації та виявляти складні зв'язки між різними параметрами, що може бути важко або неможливо здійснити вручну.
- Експерименти можуть бути дорогими та вимагати великої кількості часу. Моделювання дозволяє проводити велику кількість віртуальних експериментів швидше та економічніше, що особливо важливо в контексті досліджень, де ефективність важлива.
- Моделі дозволяють прогнозувати поведінку систем та оптимізувати їхні параметри для досягнення конкретних цілей. Наприклад, в інженерії, де кожний параметр може впливати на результат, моделі можуть допомагати знаходити оптимальні рішення.
- При проектуванні нових технологій чи матеріалів, де потрібно враховувати велику кількість параметрів, моделі можуть бути ключовим інструментом на етапі концепції та розробки. Вони дозволяють визначати, як різні змінні впливають на результат та як підходити до оптимального рішення.

Математичне моделювання часто використовується для проектування приладів.

Математична модель – це система взаємозалежних аргументів, функцій та параметрів математичних співвідношень, що визначають конкретний процес чи систему. У випадку, коли ці елементи характеризують фізичні процеси в середовищі, такі моделі вважаються фізико-математичними.

Фізико-математичні моделі виникають в результаті теоретичного дослідження приладу, охоплюючи систему рівнянь, що описують фізичні

процеси. Однак, вони не обмежуються лише системою рівнянь, а включають рішення цих рівнянь та аналіз отриманих результатів.

Існують два основних способи розв'язання фізико-математичних моделей: аналітичне та чисельне. Аналітичне розв'язання виражається у вигляді математичної залежності вихідних параметрів приладу від властивостей його компонентів та зовнішніх впливів. Однак аналітичне розв'язання можливе лише за умови суттєвих спрощень та ідеалізованих припущень. Результатом такого підходу може бути аналітичне вираження вихідних параметрів, але з невеликою точністю та частковим врахуванням реальних умов.

Чисельні методи, навпаки, застосовуються для розв'язання складних систем рівнянь, які не мають аналітичного розв'язання. Зокрема, чисельні математичні моделі отримали значне поширення завдяки розвитку ефективних алгоритмів розрахунку систем диференціальних рівнянь на комп'ютерах.

Підвищення точності фізико-математичних моделей досягається за допомогою чисельних методів. Вони дозволяють більш точно відтворювати реальні умови, застосовуючи різноманітні апроксимації та припущення. Зокрема, чисельні методи стали ключовим інструментом для автоматизованого проектування приладів та пристроїв.

Залежно від характеру вихідних параметрів, математичні моделі приладів можуть бути фізико-топологічними, електричними та технологічними [98].

Моделі, які дозволяють розраховувати взаємозалежні характеристики різних елементів пристроїв на основі фізичних законів, називаються фізико-топологічними моделями. Фізико-топологічні моделі зорієнтовані на геометричні розміри та фізичні характеристики елементів приладу та враховують фізичні процеси в системі та її оточенні. Топологія цих моделей визначається будовою самого пристрою і може бути послідовною або розгалуженою. Процес розрахунку включає в себе розв'язання окремих задач, в межах яких, з урахуванням фізичних законів і обмежень, визначаються поля фізичних величин. Розрахунок фізичних характеристик проводиться в чітко

визначеній області, яка, як правило, відповідає певному елементу або деталі пристрою. Для кожної такої області встановлюються відповідні фізичні процеси і математичні вирази, а також задаються початкові та граничні умови. Отримані поля можуть бути представлені за допомогою кольорових або тонових (монохромних) зображень.

Аналізуючи карти полів, визначають проміжні та результуючі параметри пристрою. Проміжний параметр передається в розрахунок наступної в ієрархії задачі як початкова або гранична умова. Параметром може бути точка або інтегральна характеристика лінії, область карти чи об'єм простору [99].

Найбільш загальним і досить ефективним методом чисельного розрахунку фізичних процесів у моделях складних систем є метод кінцевих елементів (МКЕ), який використовується у багатьох обчислювальних пакетах. Основна ідея методу полягає в розбитті складної області на більш прості частини, названі кінцевими елементами, для подальшого аналізу та розв'язування диференціальних рівнянь, описуючих поведінку системи.

Основні етапи МКЕ:

1. Розбиття області. Область, яка піддається аналізу, розбивається на малий набір кінцевих елементів. Ці елементи можуть мати різні геометричні форми, такі як трикутники або чотирикутники у двовимірному просторі або тетраедри та призми у тривимірному просторі.
2. Визначення вузлів. У місцях з'єднання кінцевих елементів визначаються вузли. Вузли служать точками, в яких обчислюються значення фізичних величин.
3. Формулювання математичних рівнянь. Диференціальні рівняння, що описують поведінку системи, перетворюються в алгебраїчні рівняння для кожного кінцевого елемента. Цей процес включає в себе визначення функцій форми, які апроксимують розподіл величин в межах кожного елемента.

4. Розв'язування системи рівнянь. Система алгебраїчних рівнянь, отриманих в результаті апроксимації диференціальних рівнянь, розв'язується чисельними методами для отримання значень величин у вузлах.
5. Побудова кінцевого розв'язку. Значення величин обчислюються в усіх вузлах, що дозволяє побудувати кінцевий розв'язок. Цей розв'язок може представляти розподіл напружень, температур, деформацій та інших фізичних величин в межах аналізованої області.

3.2 Програмне забезпечення, використане для моделювання

У якості програмного пакету для моделювання було обрано Comsol Multiphysics. Цей потужний інструмент виявляється надзвичайно корисним для інженерів і науковців, які стикаються з вирішенням складних та взаємопов'язаних завдань у різних галузях. Його гнучкість, ефективність та універсальність роблять його необхідним елементом у галузі інженерного дизайну та наукових досліджень.

COMSOL Multiphysics вирізняється своєю різноманітністю та потужністю, що дозволяє вирішувати складні завдання моделювання в різних фізичних областях. Ключовим аспектом цього програмного пакету є чисельний набір модулів, кожен із яких спеціалізується на конкретних фізичних процесах та областях застосування.

1. COMSOL Multiphysics: Дозволяє моделювати практично всі фізичні процеси, які описуються диференціальними рівняннями в частинних похідних.
2. COMSOL CAD IMPORT MODULE: Заснований на геометричних алгоритмах Parasolid та включає ACIS для підтримки формату SAT. Підтримує різноманітні формати файлів, такі як Parasolid, SAT, STEP і IGES.
3. COMSOL CHEMICAL ENGINEERING: Призначений для вивчення поведінки реагуючих середовищ. Дозволяє моделювати поширення рідини та газу з урахуванням явищ переносу.
4. COMSOL STRUCTURAL MECHANICS MODULE: Призначений для аналізу структурних деформацій компонентів і підсистем. Має спеціальні шаблони для моделювання каркасів, балок, плит і т.д.

5. COMSOL EARTH SCIENCE MODULE: Використовується для моделювання руху рідинних середовищ під землею. Підходить для вивчення руху нафти, газу, ґрунтових вод та поширення забруднень.
6. COMSOL HEAT TRANSFER MODULE: Дозволяє вирішувати задачі теплопередачі провідності, конвекції та випромінювання. Використовується при проектуванні систем з інтенсивними процесами теплотворення.
7. COMSOL MEMS MODULE: Призначений для проектування в області мікроелектромеханіки. Можливість моделювання процесів у пов'язаних приводах, сенсорах та п'єзоелектричних приладах.
8. COMSOL ACOUSTICS MODULE: Моделювання акустичних явищ та поширення звуку в різних середовищах.
9. COMSOL RF MODULE: Використовується при проектуванні радіопередавачів та оптичних приладів для моделювання поширення радіочастот та мікрохвиль.
10. COMSOL MATERIAL LIBRARY: Автоматизує завдання властивостей матеріалів у складних моделях. Містить властивості більше 2500 матеріалів.
11. COMSOL AC/DC MODULE: Моделювання конденсаторів, індукторів, електродвигунів та інших електромагнітних пристроїв.
12. COMSOL REACTION ENGINEERING LAB: Створення моделей хімічних систем з використанням формул хімічних реакцій.
13. COMSOL OPTIMIZATION LAB: Набір алгоритмів для розв'язання задач оптимізації з використанням методів математичного програмування SNOPT і SQOPT [100].

Однією з ключових особливостей COMSOL є його здатність до мультифізичного моделювання, що дозволяє інтегрувати різноманітні фізичні явища в єдиному середовищі. Інженери можуть ефективно моделювати взаємодію різних галузей, таких як механіка, теплофізика, електродинаміка,

гідродинаміка та біомедицина. Це дає можливість вирішувати завдання на різних масштабах – від макроскопічних конструкцій до мікро- та наноструктур.

Завдяки інтуїтивному графічному інтерфейсу, користувачі можуть легко створювати та налаштовувати складні моделі, а графічний підхід спрощує процес взаємодії з об'єктами моделі. Такий підхід полегшує аналіз та візуалізацію результатів, дозволяючи користувачам створювати анімації, графіки та зручні звіти.

Пакет також вражає своєю розширюваністю та сумісністю. Здатність до інтеграції з різними мовами програмування, такими як MATLAB та Python, робить його гнучким інструментом для вирішення широкого спектру завдань. Використання додаткових модулів дозволяє розширити можливості пакету та вирішити конкретні завдання в різних галузях [101].

Геометрична область або модель фізичного об'єкта є визначальним аспектом чисельного моделювання в середовищі COMSOL Multiphysics. Визначаючи розрахункову область, вчені та інженери створюють основу для проведення досліджень, використовуючи різні фізичні модулі. В самому COMSOL Multiphysics існують вбудовані конструктори геометричних областей, однак для складних структур це може вимагати значного часу та зусиль.

Взаємодія з геометричною областю включає конструювання чи моделювання фізичної конструкції об'єкта. Існують різні підходи до цього процесу в залежності від розмірності простору, в якому відбуваються дослідження. Враховуючи, що COMSOL Multiphysics підтримує одно-, дво-, трьохмірні просторово-часові дослідження, методи створення геометричної моделі можуть різнитися.

Один з підходів - використання вбудованих конструкторів, що є зручними для простих геометричних об'єктів. Однак для більш складних структур ефективніше використовувати спеціалізовані програми для графічного моделювання, такі як AutoCAD. У таких програмах можна швидше та

ефективніше створювати складні геометричні об'єкти, а потім імпортувати їх безпосередньо в середовище COMSOL Multiphysics [100].

Після визначення геометрії, властивостей та граничних умов моделі важливим етапом є розділення області на кінцеві елементи. В COMSOL Multiphysics це можна здійснити вибором сітки за замовчуванням. Система пропонує дев'ять різних рівнів сітки, від EXTREMELY FINE (НАДЗВИЧАЙНО ТОЧНИЙ) до EXTREMELY COARSE (НАДЗВИЧАЙНО ГРУБИЙ), а також інші варіанти між ними. Для багатьох моделей, не пов'язаних з потоком, вибір одного зі стандартних розмірів кінцевих елементів може бути достатнім, оскільки система автоматично здійснює згущення сітки для дрібних елементів. У випадку потреби в згущенні сітки в певній області, можна використовувати пункт ReFINE з меню MESH.

У лінійних задачах одномірного та двомірного стаціонарного режиму можна вибирати найдрібнішу сітку, оскільки швидкість обчислення в цьому випадку слабо залежить від розділення, але може суттєво залежати від особливостей геометрії та процесу.

Рекомендується будувати сітку так, щоб між будь-якими двома границями було не менше десяти кінцевих елементів. У двомірному режимі COMSOL Multiphysics за замовчуванням будує трикутну сітку, але існує можливість задати параметри сітки, тип кінцевих елементів та спосіб розділення на кінцеві елементи.

В двомірному випадку можна використовувати різні конструкції (Рисунок 2.6): трикутна сітка (а), чотирикутна сітка (б), сітка, нанесена як карта (в), особливе розділення поблизу границі двомірної області (г), крайові одномірні умови тощо.

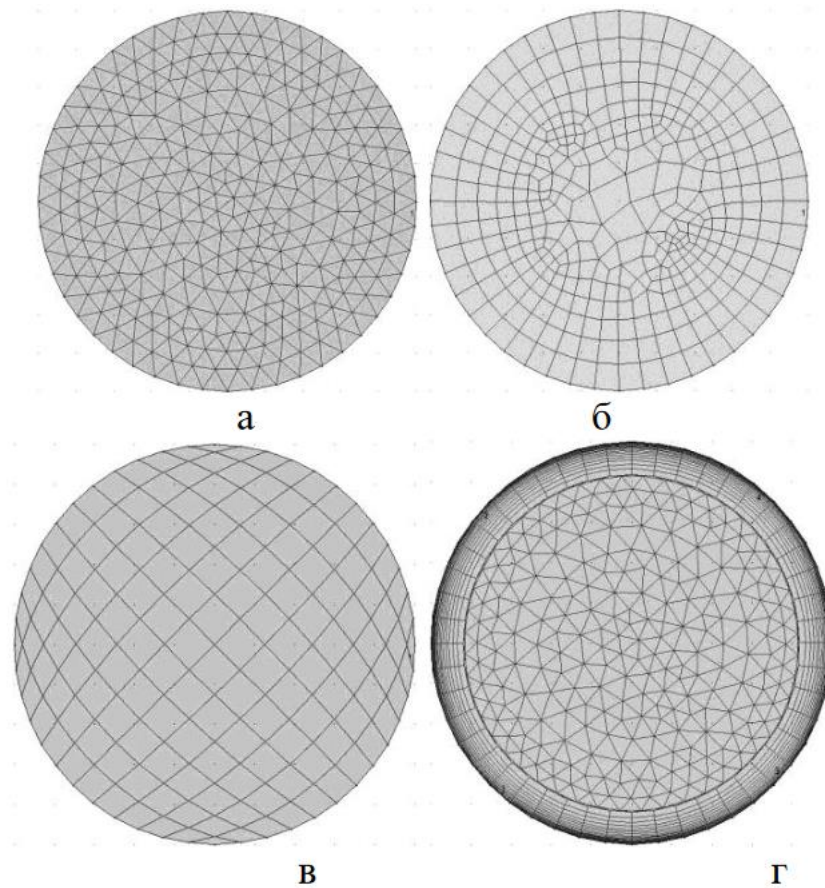


Рисунок 2.6 – Види двомірної сітки у COMSOL Multiphysics: а – трикутна; б – чотирикутна; в – чотирикутна з урахуванням маски; г – трикутна з ущільненням уздовж границі

Важливо враховувати особливості геометрії об'єктів та характеру процесу при виборі типу сітки для забезпечення якості та ефективності чисельного моделювання.

У тривимірному варіанті розділення в COMSOL Multiphysics можна використовувати різні конструкції для створення сітки:

1. FREE TRIANGULAR – тетрагональна сітка (Рисунок 2.7а).
2. SWEPT – сітка, заснована на багатокутниках (Рисунок 2.7б).
3. BOUNDARY LAYERS – особливе розділення поблизу границі тривимірної розрахункової області.
4. FREE TRIANGULAR 2D – трикутна сітка поверхні тривимірного об'єкта.
5. FREE QUAD – чотирикутна сітка поверхні тривимірного об'єкта.

6. MAPPED – сітка, нанесена як карта, на поверхню тривимірного об'єкта.
7. EDGE – крайові одномірні умови.

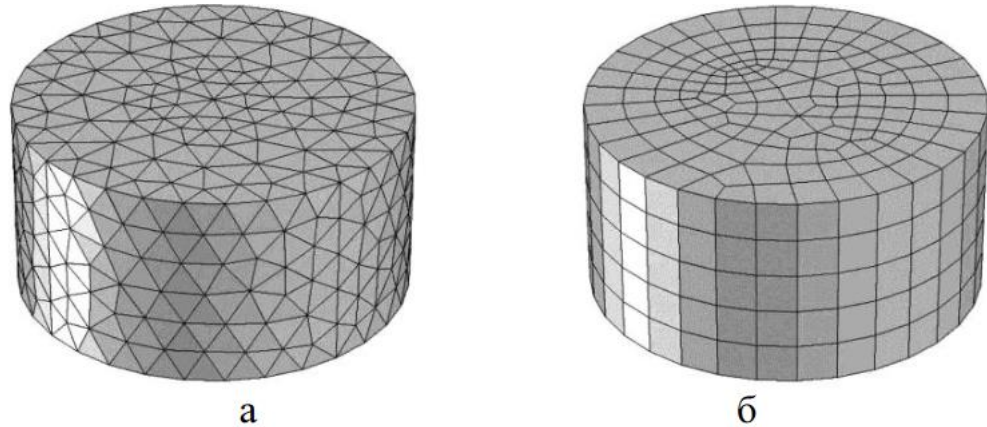


Рисунок 2.7 – Види тримірної сітки у COMSOL Multiphysics: а – тетрагональна; б – заснована на багатокутниках

Важливо враховувати, що метод кінцевих елементів має свої особливості, пов'язані з чисельним розв'язком та відмінностями від реального процесу. В окремих випадках може виникнути ситуація, коли накопичена похибка призводить до збіжного чисельного розв'язку, який не відображає вихідну задачу. Це може виникнути внаслідок особливостей геометрії кінцевих елементів та специфічного розділення. Для підвищення достовірності отриманих результатів рекомендується проводити чисельне моделювання з використанням декількох типів розділення [100].

Очевидно, що від параметрів обчислювального обладнання залежить достовірність обчислень і правильна оптимізація розв'язку. Неправильне налаштування може призвести до грубих помилок розв'язку, які важко виявити. Некоректний добір параметрів може також призвести до тривалих розрахунків для тривіальних задач. Таким чином, правильний вибір вирішувача і його налаштувань є одним із ключових етапів моделювання.

Для створення вирішувача в COMSOL Multiphysics можна використовувати різні типи розрахунків, кожен з яких має свої вирішувачі й специфічні налаштування. У MODEL BUILDER потрібно створити STUDY та

всередині нього створити вирішувач, обравши SOLVER CONFIGURATION \Rightarrow SOLVER (Рисунок 2.8а) або здійснити розрахунок з налаштуваннями за замовчуванням, натиснувши COMPUTE (Рисунок 2.8б).

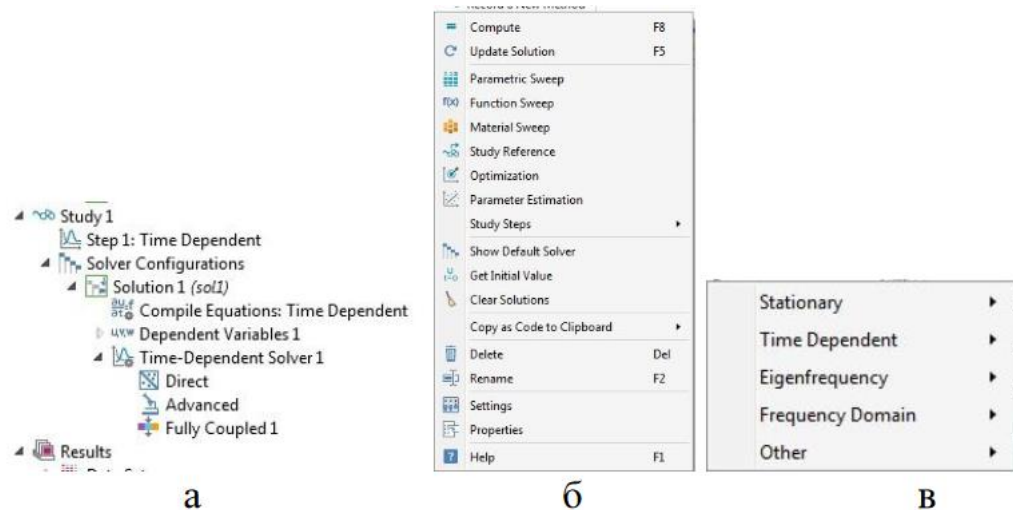


Рисунок 2.8 – Інтерфейс вирішувачів: а – меню STUDY; б – вирішувачи; в – їх різновиди

Існують сім типів розрахунків, кожен з яких відповідає конкретному виду фізичного процесу (Рисунок 2.8в). При виборі типу розрахунку, спочатку важливо визначитися з тим, чи досліджуємо стаціонарний чи перехідний процес. Якщо процес нестационарний, то в більшості випадків підходить вирішувач TIME DEPENDENT. Для рідких задач, пов'язаних із знаходженням власних значень диференціальних рівнянь, таких як хвильове рівняння, можна вибрати вирішувач EIGENVALUE.

Налаштування вирішувача можна змінювати у відповідному вікні SETTINGS. Наприклад, для TIME DEPENDENT вказуються часові прошарки та крок за часом, а поля TOLERANCE визначають точність на кожному кроці ітерації. Для досягнення точних результатів і врахування особливостей системи, рекомендується коректно налаштовувати параметри вирішувача, враховуючи конкретні вимоги задачі.

Більш детально можливості програмного пакету COMSOL Multiphysics розглянуто в [100, 101].

Переваги використання COMSOL Multiphysics:

1. COMSOL Multiphysics дозволяє моделювати широкий спектр фізичних процесів, що описуються диференціальними рівняннями в частинних похідних. Це робить його універсальним інструментом для вирішення різноманітних завдань.
2. Пакет має чисельний набір модулів, що дозволяє використовувати лише ті, які необхідні для конкретної задачі. Це забезпечує ефективне використання ресурсів та спрощує інтерфейс користувача.
3. Зручні інструменти для створення геометричних об'єктів, включаючи можливість імпорту зовнішніх моделей, що дозволяє швидше побудовувати складні геометричні об'єкти.
4. COMSOL дозволяє моделювати теплопередачу, механічні напруження, електромагнітні поля, хімічні реакції та інші фізичні процеси, що часто можна вивчати як один комплексний процес.
5. Використовується як у наукових дослідженнях, так і в промисловості для розв'язання реальних інженерних завдань.

Недоліки використання COMSOL Multiphysics:

1. Ліцензійна вартість COMSOL досить висока, що може бути недосяжною для окремих користувачів чи невеликих компаній.
2. У зв'язку з багатофункціональністю пакету, вивчення всіх його можливостей може займати значний час та зусилля.
3. Для великих та складних моделей може вимагати значних ресурсів обчислювального обладнання, що може бути обмежувальним.
4. Використання COMSOL вимагає не лише знання фізичних процесів, але й досвід у налаштуванні різних параметрів для досягнення точних результатів.

5. Точність результатів моделювання може суттєво залежати від якості побудованої геометричної моделі.

Хоча COMSOL Multiphysics є потужним інструментом для інженерного моделювання, користувачам слід урахувати ці переваги та недоліки при виборі платформи для своїх конкретних завдань.

3.3 Опис математичної моделі для дослідження тліючого розряду у коаксіальній системі електродів

Чисельна модель ТР формулюється для вісесиметричної геометрії. Структура ТР описується у межах дифузійно-дрейфової моделі, сформульованої відносно електронної та іонної компонент.

Оскільки у моделі використовуються дані поперечних перетинів для визначення коефіцієнтів джерел у моделі, необхідно вибрати функцію розподілу енергії електронів (ФРЕЕ).

ФРЕЕ має дуже важливе значення при моделюванні плазми, оскільки вона є необхідною для опису джерела електронів та транспортних властивостей на основі відповідних перетинів реакцій зі зіткненням електронів. За замовчуванням у фізичному інтерфейсі плазми використовується ФРЕЕ за Максвеллом. Це є хорошим варіантом для підготовки моделі та оцінки загальних тенденцій (наприклад, густини електронів в залежності від застосованої напруги). У нашому випадку електрони перебувають у термодинамічній рівновазі один з одним, і тому максвеллівська функція розподілу є відповідною.

Функції, що описують ФРЕЕ за Максвеллом:

$$f(\varepsilon) = \varphi^{-\frac{3}{2}} \beta_1 e^{-\frac{\varepsilon \beta_2}{\varphi}} \quad (3.1)$$

$$\beta_1 = \Gamma\left(\frac{5}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \Gamma\left(\frac{3}{2}\right)^{-\frac{5}{2}} \quad (3.2)$$

$$\beta_2 = \Gamma\left(\frac{5}{2}\right) \Gamma\left(\frac{3}{2}\right)^{-1} \quad (3.3)$$

де ε – енергія електрона в еВ, φ – середня енергія електронів в еВ, Γ – неповна гамма-функція.

Густина електронів обчислюється шляхом розв'язування рівняння дрейфу-дифузії для електронної густини:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{\Gamma}_e = R_e \quad (3.4)$$

$$\vec{\Gamma}_e = -(\vec{\mu}_e \cdot \vec{E})n_e - \vec{D}_e \cdot \nabla n_e \quad (3.5)$$

де n_e – концентрація електронів, $\vec{\mu}_e$ – електронна рухливість, \vec{E} – електричне поле, \vec{D}_e – коефіцієнт дифузії електронів, $\vec{\Gamma}_e$ – потік електронів, R_e – джерело електронів.

Коефіцієнт дифузії електронів обчислюється з їхньої рухливості за відношенням

$$\vec{D}_e = \vec{\mu}_e T_e \quad (3.6)$$

Коефіцієнти джерела у наведених рівняннях визначаються хімією плазми з використанням коефіцієнтів швидкості. Припустимо, що існують M реакцій, які сприяють зростанню або зменшенню електронної густини та P непружних електронно-нейтральних зіткнень, при цьому $P \gg M$. У випадку коефіцієнтів швидкості складова джерела електронів задається наступним чином:

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_e \quad (3.7)$$

де x_j – мольна частка частинки-мішені для j -ї реакції, k_j – коефіцієнт швидкості j -ї реакції, N_n – загальна густина нейтральних частинок.

Для розрядів постійного струму краще використовувати коефіцієнти Таунсенда замість коефіцієнтів швидкості для визначення швидкості реакції. Коефіцієнти Таунсенда краще описують те, що відбувається в області

катодного падіння [102]. При використанні коефіцієнтів Таунсенда складова джерела електронів визначається виразом

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j \alpha_j N_n |\Gamma_e| \quad (3.8)$$

де α_j – коефіцієнт Таунсенда для j -ї реакції.

Для інших частинок (не електронів) для масової частки кожної складової розв'язується наступне рівняння:

$$\rho \frac{\partial \omega_k}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \omega_k = \nabla \cdot \vec{J}_k + R_k \quad (3.9)$$

де ω_k – масова частка k -ї частинки, ρ – густина суміші, \vec{u} – усереднений по масі вектор швидкості газу, \vec{J}_k – вектор дифузійного потоку, R_k – вираз швидкості для k -ї частинки.

Конвекцією електронів внаслідок руху газу можна знехтувати.

При використанні наближення локального поля рівняння густини електронів не розв'язується, а коефіцієнти переносу та джерело відображаються зведеним електричним полем. На практиці при використанні наближення локального поля або наближення локальної енергії коефіцієнти переносу та джерело також визначаються як функція середньої енергії електронів. Однак при використанні наближення локального поля необхідно надати функцію, яка пов'язує середню енергію електронів і зведене електричне поле:

$$\varepsilon = F \left(\frac{E}{N} \right) \quad (3.10)$$

Оскільки в моделі використовується постійний струм, зміни поля в часі є незначними. Математично це еквівалентно обнуленню всіх похідних по часу в рівняннях Максвелла. Таким чином, можна використовувати рівняння для

електростатичного поля. Електростатичне поле обчислюється за рівняннями Пуассона (3.11) та законом Гауса (3.12):

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (3.11)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}) = \rho_q \quad (3.12)$$

де ε_0 – електрична стала, ε_r – діелектрична проникність середовища, ρ_q – просторова густина заряду.

Просторова густина заряду ρ_q автоматично обчислюється на основі хімії плазми, зазначеної в моделі.

Напруга на аноді визначається рівнянням

$$V = V_0 - I_p R_b - R_b C_b \frac{dV}{dt} \quad (3.13)$$

де V_0 – прикладена напруга, R_b – баластний опір, C_b – роздільний конденсатор, I_p – загальний струм, який визначається інтегруванням по поверхні аноду:

$$I_p = \int_{\partial\Omega} (\vec{n} \cdot \vec{J}_i + \vec{n} \cdot \vec{J}_e + \vec{n} \cdot \vec{J}_d) dS \quad (3.14)$$

Внаслідок взаємодії електронів зі стінками відбувається втрата електронів, і через вторинну емісію відбувається їхня генерація. Це призводить до граничної умови для потоку електронів:

$$\vec{n} \cdot \vec{\Gamma}_e = \frac{1-r_e}{1+r_e} \left(\frac{1}{2} v_{e,th} n_e \right) - (\sum \gamma_j (\vec{\Gamma}_j \cdot \vec{n}) + \vec{\Gamma}_t \cdot \vec{n}) \quad (3.15)$$

де r_e – коефіцієнт відбиття, γ_j – коефіцієнт вторинної емісії електронів, $\vec{\Gamma}_j$ – потік електронів, утворених внаслідок вторинної емісії, $\vec{\Gamma}_t$ – потік електронів, утворених внаслідок термоемісії.

Хімія плазми азоту дуже складна, і детальне вивчення основних збуджених станів легко може включати сотні реакцій. У нашій моделі використовується спрощений набір реакцій, який досить точно описує поведінку заряджених частинок у системі.

В Таблиці 3.1 перераховані хімічні реакції, розглянуті в [103]. В якості газу використовується молекулярний азот N_2 , позначений як А. А може іонізуватися, утворюючи позитивні іони A^+ , і може приєднувати електрони, утворюючи від'ємні іони A^- .

Таблиця 3.1 – Рівняння об'ємних реакцій

Номер реакції	Формула	Тип	Енергія, eV	Коефіцієнт швидкості, (m^3/c)
1	$e+A \Rightarrow A^{++}+2e$	Іонізація	15	-
2	$e+A \Rightarrow A^-$	Прикріплення	-	-
3	$e+2A \Rightarrow A^-+A$	Прикріплення	-	-
4	$e+A^+ \Rightarrow A$	Реакція	-	$5 \cdot 10^{-14}$
5	$A^-+A^+ \Rightarrow 2A$	Реакція	-	$2 \cdot 10^{-12}$

Поява і зникнення електронів у об'ємі описуються коефіцієнтами Таунсенда для іонізації і прикріплення, а також константами швидкості трьохчастинкового приєднання і електронно-іонної рекомбінації. Коефіцієнти Таунсенда отримують як функцію середньої енергії електронів шляхом відповідного усереднення за розподілом енергії електронів, обчисленому з використанням рішення Больцмана [104].

У стійкому стані основними зарядженими частинками плазми є іони. З цієї причини початкові умови мають однакову густину позитивних і від'ємних іонів та невелику густину електронів. Такі початкові умови дозволяють зберігати зарядову нейтральність.

Крім об'ємних реакцій, реалізуються поверхневі реакції, вказані в Таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 – Поверхневі реакції

Номер реакції	Формула	Коефіцієнт прилипання
1	$A^{+} \Rightarrow A$	1
2	$A^{-} \Rightarrow A$	1

Припускається, що коли іони досягають стінки, вони знову перетворюються в нейтральні атоми. Зазначимо, що коефіцієнт вторинної емісії позитивних іонів в нашій моделі встановлений рівним 0,2 на межі катоду і 0 на інших межах. Середня енергія вторинного електрона встановлена рівною 4 еВ.

Висновки до Розділу 3

1. Комп'ютерне моделювання, як предмет досліджень, виявляється надзвичайно важливим інструментом в різних галузях, починаючи від науки і завершуючи інженерією та технологіями. Цей процес дозволяє науковцям та інженерам аналізувати та прогнозувати різноманітні фізичні, хімічні, біологічні, технічні та соціальні явища.
2. Використання різноманітних програмних засобів, таких як COMSOL Multiphysics, дозволяє моделювати складні процеси та отримувати числові результати, які є важливими для розуміння і управління фізичними системами. Однак важливо враховувати обмеження та недоліки, такі як велика вартість, складність вивчення та обмеження апаратного забезпечення, які можуть виникати при використанні певних програмних продуктів.
3. Структура ТР описується у межах дифузійно-дрейфової моделі, сформульованої відносно електронної та іонної компонент.

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ

4.1 Опис моделі, розробленої в COMSOL Multiphysics

Для дослідження ТР було розроблено двовірну модель коаксіальної системи електродів з осью симетрії із внутрішнім анодом (Рисунок 4.1).

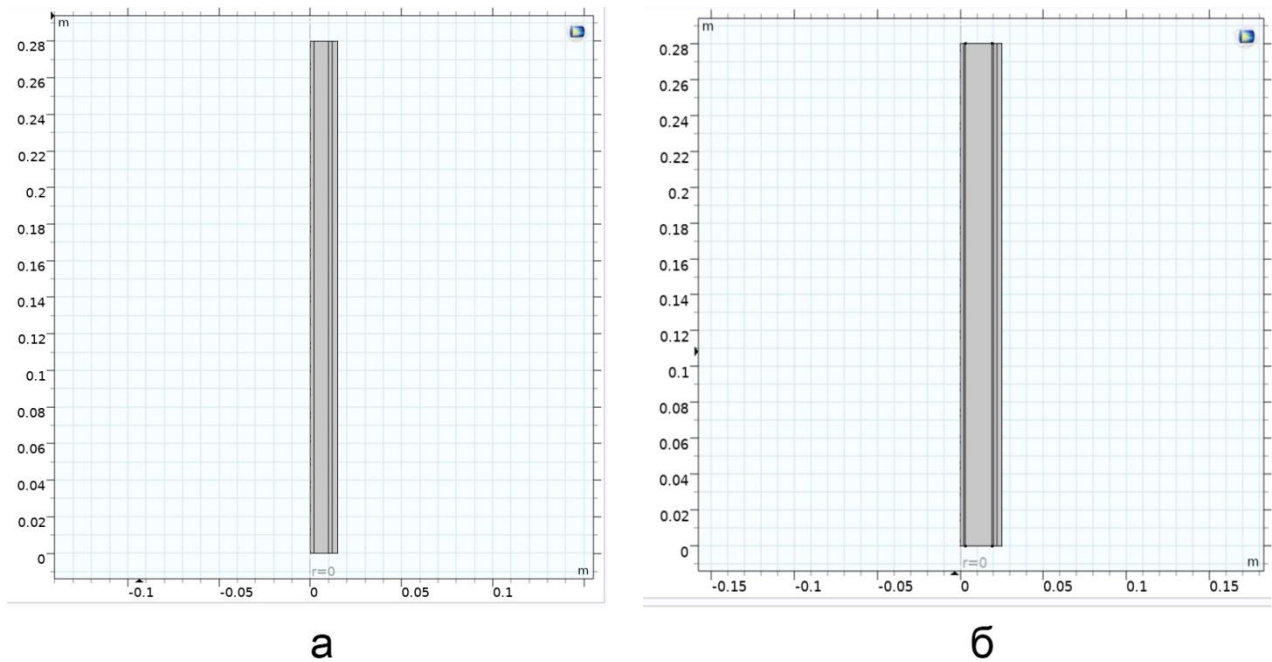


Рисунок 4.1 – Геометрія моделі: а – відстань між електродами 1 см; б – відстань між електродами 2 см

Так як досліджувався вплив геометрії на параметри ТР, використовувалися два радіуса катоду: 1 см (Рисунок 4.1, а) і 2 см (Рисунок 4.1, б). В обох випадках використовувалась довжина системи 28 см, радіус анода 2 мм і товщина катоду 2 мм.

Для розрахунку було побудовано кінцево-різницеву сітку з максимальним розміром елемента в 2,8 мм (детальні параметри наведено на Рисунку 4.2, а). Для уникнення дрейфової дифузії сітку було ущільнено на краях системи. Мінімальний розмір елемента в зазначених областях склав 0,3 мм (Рисунок 4.2, б).

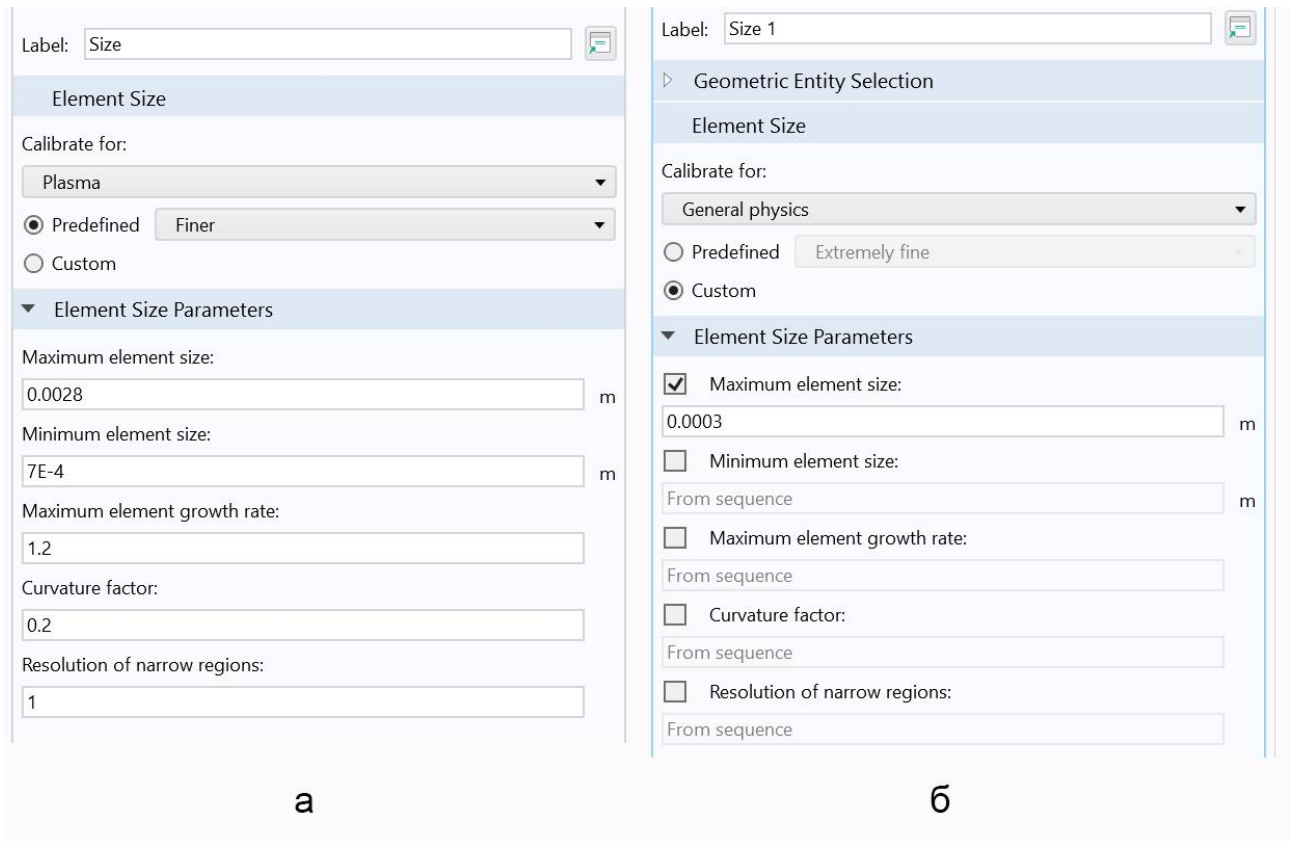


Рисунок 4.2 – Розміри елементів кінцево-різницевої сітки: а – загальна; б – ущільнення біля країв системи

Враховуючи, що біля катода існує прикатодне падіння потенціалу, біля границі катода було додано сітку з 8 додаткових тонких шарів. Загальний вигляд сітки для обох радіусів катода наведено на Рисунках 4.3 і 4.4.

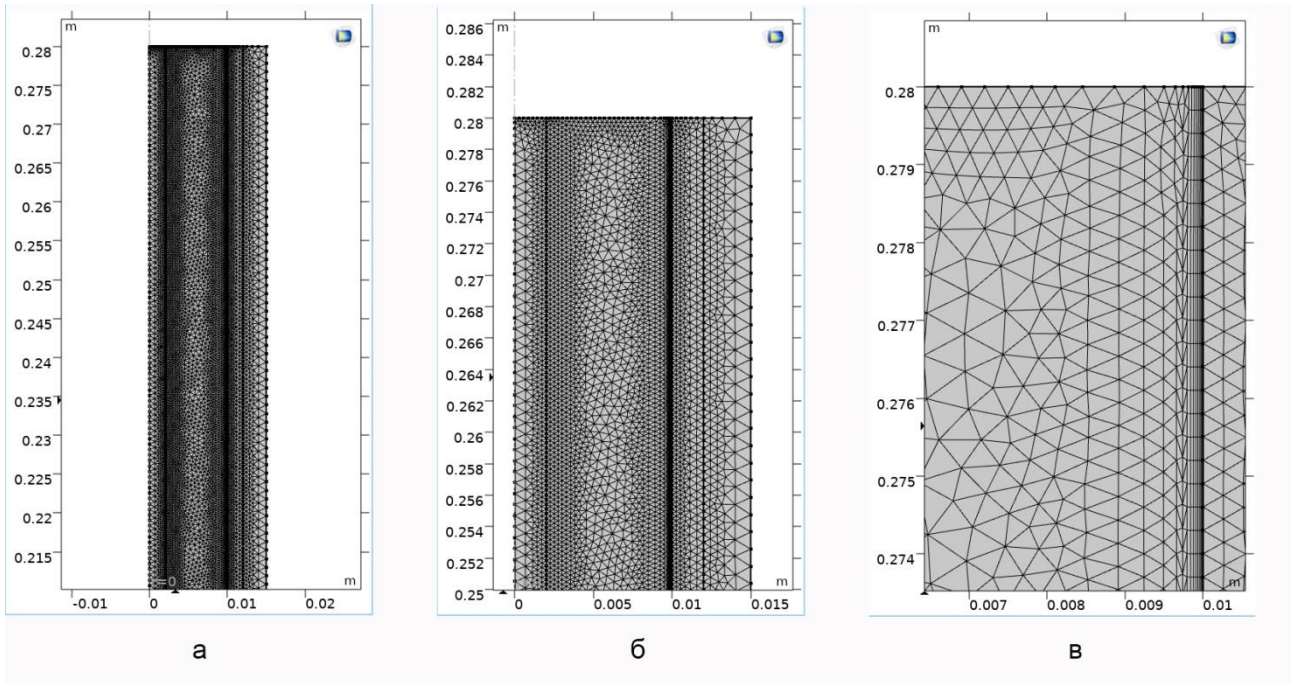


Рисунок 4.3 – Вигляд сітки для системи з радіусом катоду 1 см: а – загальний; б – масштабований; в – тонкі шари біля катоду

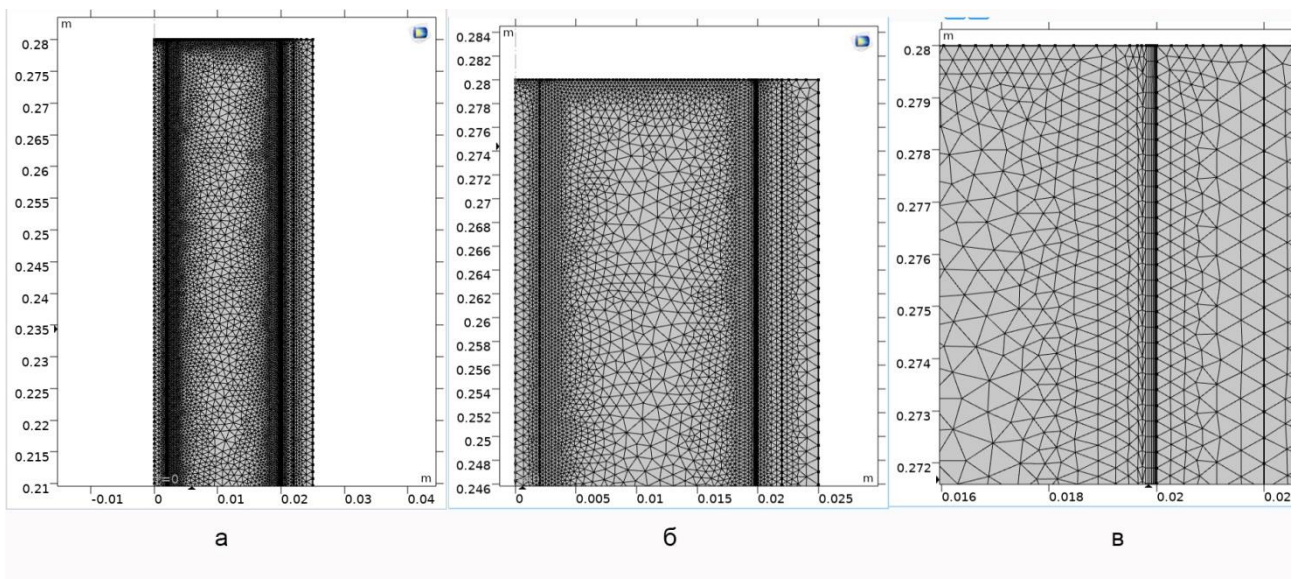


Рисунок 4.4 – Вигляд сітки для системи з радіусом катоду 2 см: а – загальний; б – масштабований; в – тонкі шари біля катоду

В моделі були задані змінні, які наведено в Таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Змінні, задані у моделі

Змінна	Значення	Одиниці	Опис
ve	$\mu_{eN}(\text{plas.Erd}) * \text{plas.Erd}$	м/с	Швидкість електронів
Ratt1	$\eta_1(\text{plas.Erd}) * \text{plas.Nn} * \text{ve} / \text{plas.c_wA}$	$\text{м}^3 / (\text{с} \cdot \text{моль})$	Константа швидкості для прикріплення
Ratt2	$\eta_2(\text{plas.Erd}) * \text{plas.Nn}^2 * \text{ve} / \text{plas.c_wA}$	$\text{м}^3 / (\text{с} \cdot \text{моль})$	Константа швидкості для прикріплення для 3 тіл
Ri	$\alpha * \text{ve} / \text{plas.c_wA}$	$\text{м}^3 / (\text{с} \cdot \text{моль})$	Константа швидкості для іонізації
alpha	$\alpha(\text{plas.Erd}) * \text{plas.Nn}$	1/м	Коефіцієнт Таунсенда
betaep	$5e-8 [\text{cm}^3/\text{s}] * N_A_const$	$\text{м}^3 / (\text{с} \cdot \text{моль})$	Електрон-іонна рекомбінація
betapn	$2e-6 [\text{cm}^3/\text{s}] * N_A_const$	$\text{м}^3 / (\text{с} \cdot \text{моль})$	Іон-іонна рекомбінація
DeN	$1800 [\text{cm}^2/\text{s}] * \text{plas.Nn}$	1/(м·с)	Коефіцієнт дифузії
ne0	$1e10 [\text{m}^{-3}]$	$1/\text{м}^3$	Початкова кількість електронів
ni0	$1e16 [\text{m}^{-3}]$	$1/\text{м}^3$	Початкова кількість іонів
t0	300[K]	К	Температура газу
muiN	$6e21 [1/(\text{V} * \text{s} * \text{m})]$	1/(В·м·с)	Рухливість іонів

Коефіцієнти Таунсенда та рухливості електронів було задано аналітичними функціями α (Рисунок 4.5) та μ_{eN} (Рисунок 4.6).

Label:

Function name:

▼ Definition

Expression:

Arguments:

Derivatives:

▷ Periodic Extension

▼ Units

Function:

Argument	Unit
x	Td

▷ Advanced

▼ Plot Parameters

Argument	Lower limit	Upper limit	Unit
x	0	1	V*m^2

Рисунок 4.5 – Аналітична функція α

Label:

Function name:

▼ Definition

Expression:

Arguments:

Derivatives:

▷ Periodic Extension

▼ Units

Function:

Argument	Unit
x	Td

▷ Advanced

▼ Plot Parameters

Argument	Lower limit	Upper limit	Unit
x	0	10000[Td]	V*m^2

Рисунок 4.6 – Аналітична функція μeN

Аналітичні функції *eta1* (Рисунок 4.7) та *eta2* (Рисунок 4.8) визначають константу швидкості приєднання для двох і трьох тіл відповідно (змінні *Ratt1* і *Ratt2* у Таблиці 4.1).

Label:

Function name:

▼ Definition

Expression:

Arguments:

Derivatives:

▷ Periodic Extension

▼ Units

Function:

Argument	Unit
x	Td

▷ Advanced

▼ Plot Parameters

Argument	Lower limit	Upper limit	Unit
x	0	10000[Td]	V*m^2

Рисунок 4.7 – Аналітична функція *eta1*

Label:

Function name:

▼ Definition

Expression:

Arguments:

Derivatives:

▷ Periodic Extension

▼ Units

Function:

Argument	Unit
x	Td

▷ Advanced

▼ Plot Parameters

Argument	Lower limit	Upper limit	Unit
x	0	10000[Td]	V*m^2

Рисунок 4.8 – Аналітична функція *eta2*

Розрахунки проводилися в модулі *Plasma* в області між катодом і анодом (Рисунок 4.9), так як розряд відбувається саме в цій області і інші не представляють для нас інтересу.

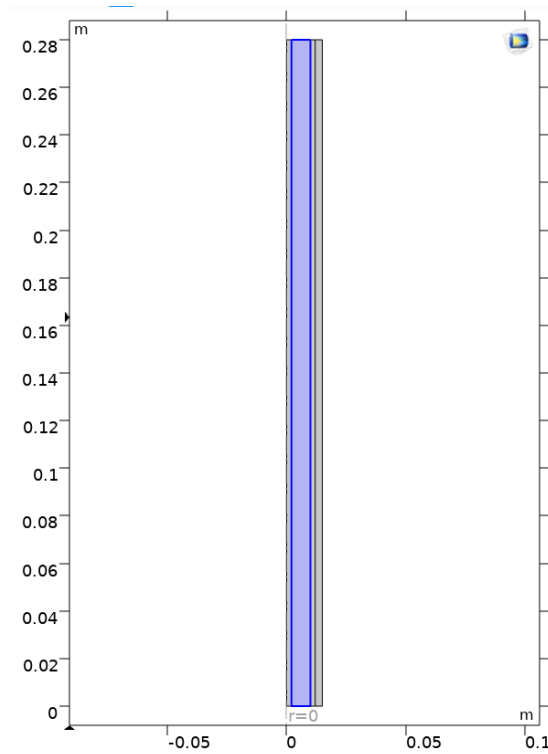


Рисунок 4.9 – Область розрахунків у модулі *Plasma*

Умови для стінок *Wall* (формула 3.15) були додані до границь катоду і аноду у розрахунковій області (Рисунок 4.10, а). Для торців системи (Рисунок 4.10, б) були додані умови *Zero charge* і *Insulation*, що задаються рівняннями (4.1) і (4.2) відповідно:

$$-\vec{n} \cdot \vec{D} = 0 \quad (4.1)$$

$$-\vec{n} \cdot \vec{\Gamma}_e = 0 \quad (4.2)$$

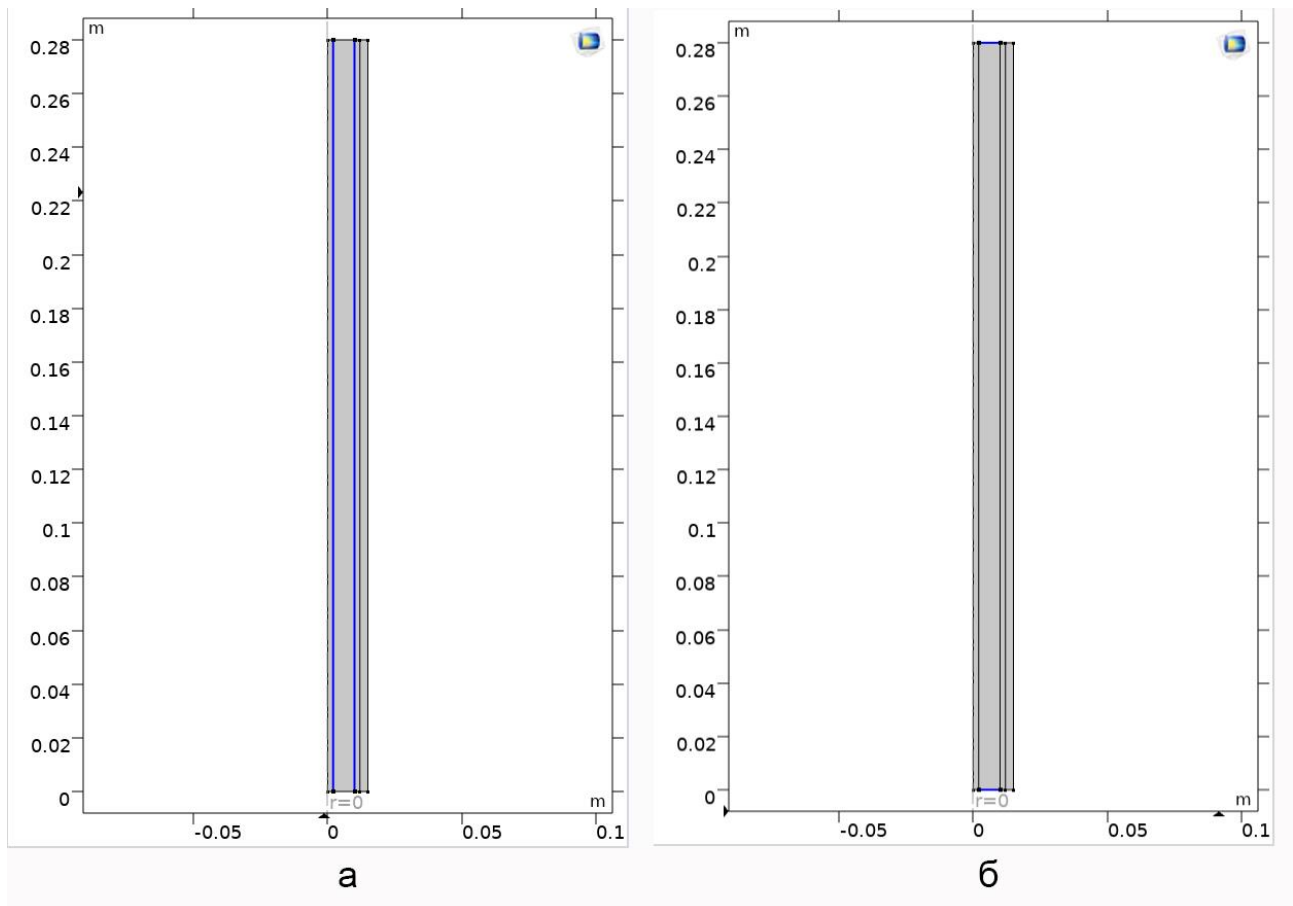


Рисунок 4.10 – Границі моделі: а – анод і катод, на які додано умову *Wall*; б – торці системи, на які додано умови *Zero charge* і *Insulation*

До границі катоду було додано умову заземлення *Ground* ($V = 0$), до аноду – умову *Metal Contact* (формули 3.13, 3.14). Ємність розділового конденсатору C_b – 1 пФ, баластний опір R_b для системи з радіусом катоду 1 см – 4 кОм, 2 см – 6 кОм. Вибір різних значень баластного опору для різних радіусів зумовлений тим, що потенціал запалювання залежить від добутку тиску на відстань між електродами pd (Рисунок 4.11). Ця залежність має назву кривої Пашена.

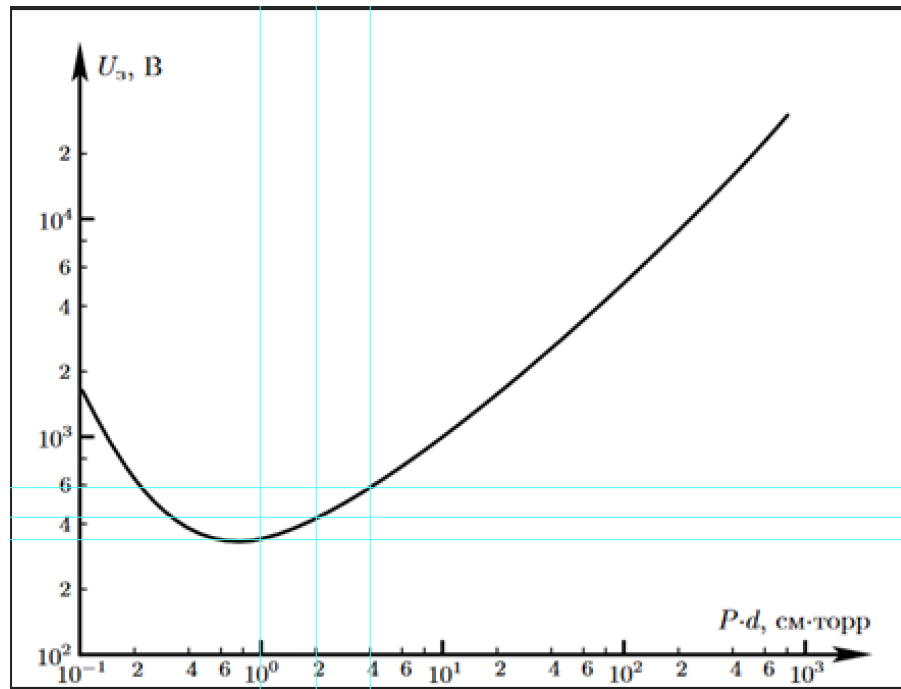


Рисунок 4.11 – Крива Пашена для повітря

На Рисунку 4.11 можна помітити, що зі зростанням pd на проміжку в одиниці см·торр збільшується напруга запалювання, а отже, для того, щоб відбувся пробій газу, зі збільшенням відстані між електродами та/або тиску газу потрібно збільшувати і прикладену напругу, щоб розряд загорівся. Але так як навантажувальна пряма $U = \varepsilon - R_b I$ повинна мати більш крутий нахил, ніж ділянка кривої ВАХ в точці їх перетину для забезпечення стійкості розряду і уникнення явища неконтрольованого зростання струму, баластний опір у системі має бути достатньо великим.

В моделі використовувалося часозалежне дослідження (*Time dependent*) у діапазоні від 10 нс до 1 мс. Цього часу достатньо для запалювання ТР, і збільшення діапазону не змінює фінальні результати. Дослідження проводилося для декількох значень прикладеної напруги та тисків газу, що наведені у Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Значення напруг та тисків, для яких проводилося дослідження

Відстань між електродами	Параметр	Використані значення
1 см	Прикладена напруга V_0 , В	390, 400, 500, 600
	Тиск p , торр	1, 2
2 см	Прикладена напруга V_0 , В	400, 500, 600, 1000, 1200
	Тиск p , торр	1, 2

Для системи з радіусом катода 2 см значень напруги досліджувалося більше по зазначеним вище причинам: потенціал запалювання збільшується зі зростанням величини pd . При цьому у випадку більшої відстані між електродами результати для 390 В не мають суттєвих відмінностей від результатів для 400 В.

4.2 Результати моделювання та їх аналіз

4.2.1 Розподіл потенціалу

На Рисунку 4.12 представлено профілі розподілу потенціалу в системі для часу $t = 0,01$ с (всі подальші результати будуть представлені для цього часу) у системі із радіусом катоду 1 см.

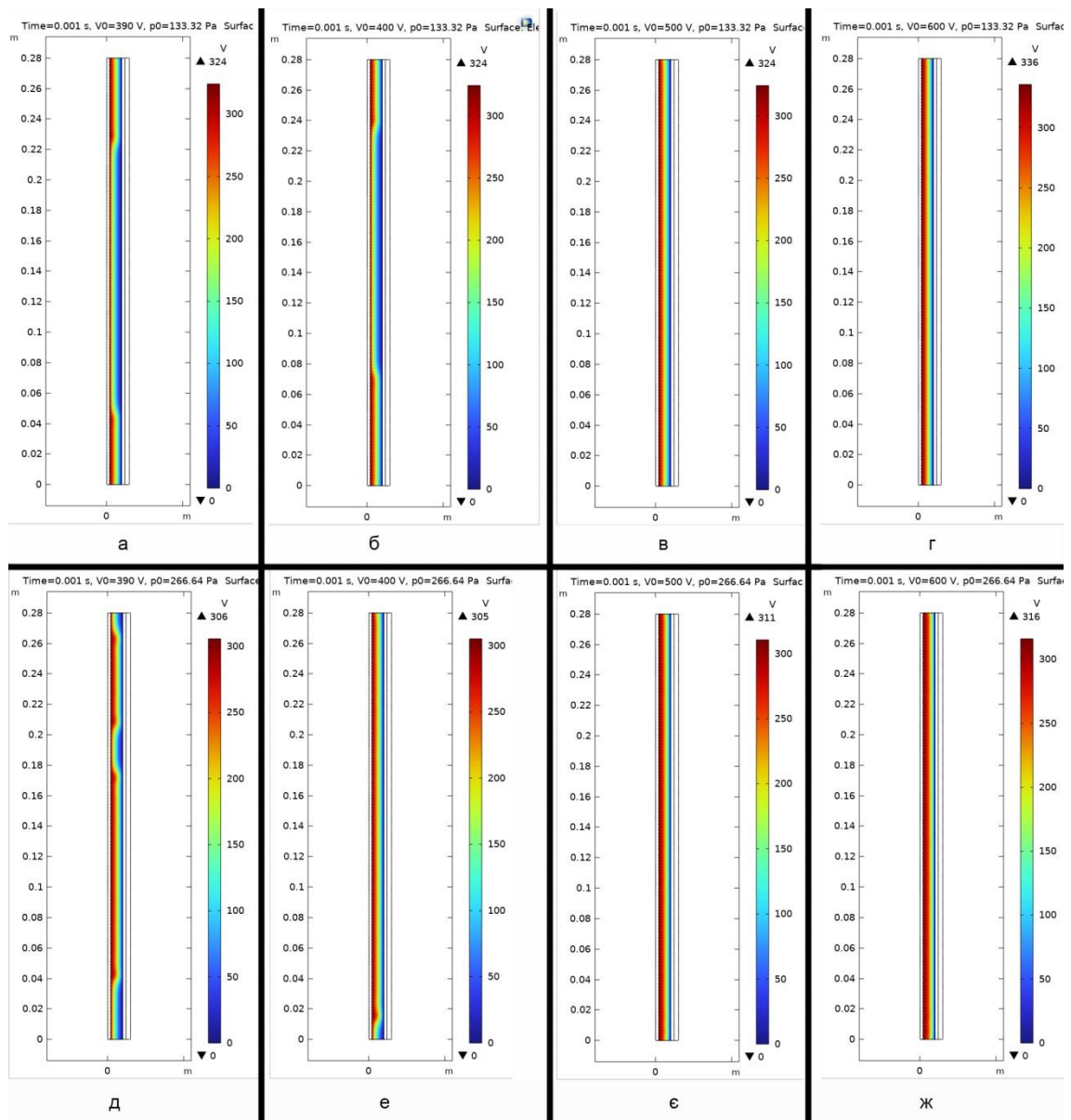


Рисунок 4.12 – Профілі розподілу потенціалу для системи з радіусом катоду 1 см ($p = 1$ торр: $V_0 = 390$ В (а), 400 В (б), 500 В (в), 600 В (г); $p = 2$ торр: $V_0 = 390$ В (д), 400 В (е), 500 В (є), 600 В (ж))

На Рисунку 4.13 представлено розподіли потенціалу вздовж радіусу системи на висоті 25 см.

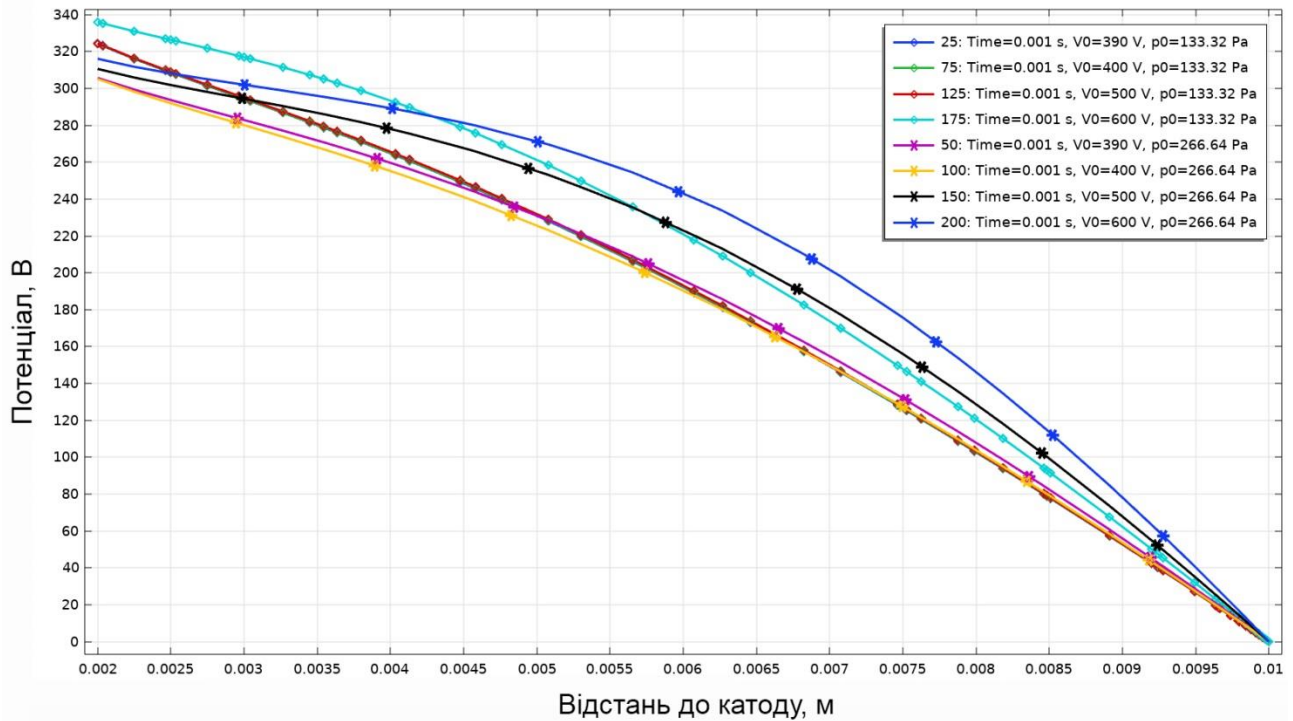


Рисунок 4.13 – Розподіли потенціалу вздовж радіусу системи на висоті 25 см

Як можна помітити, на Рисунку 4.12, а, б, д, е спостерігається нормальний ТР. На Рисунку 4.12, в відбувається перехід від нормального до аномального режиму. У випадках а, б і в падіння напруги залишається постійним, зі зростанням прикладеної напруги збільшується площа катодної плями: на Рисунку 4.12, в вона вже займає всю поверхню, і катодне падіння потенціалу стає однаковим на будь якій висоті системи електродів. Це можна побачити і на Рисунку 4.13: графіки розподілу потенціалу для $p = 1$ торр, $V_0 = 390, 400, 500$ В співпадають, і прикатодне падіння напруги в усіх трьох випадках становить 324 В. Якщо збільшити V_0 до 600 В, можна спостерігати аномальний ТР. Як і передбачає теорія, прикатодне падіння напруги при цьому починає зростати і складає 336 В (Рисунок 4.12, г).

Для тиску в 2 торр і прикладеної напруги $V_0 = 390$ і 400 В (Рисунок 4.12, д, е) прикатодне падіння напруги становить 305-306 В, і теж залишається постійним до переходу в аномальний режим. При $V_0 = 500$ і 600 В падіння напруги складає 311 і 316 В відповідно, що цілком узгоджується з теорією.

Слід відмітити, що задля перевірки коректності розрахунків, були проведені обчислення також для прикладеної напруги $V_0 = 300$ В, що очевидно менше за потенціал запалювання, згідно до кривої Пашена, і при цьому ТР в системі не виникло.

На Рисунку 4.14 представлено профілі розподілу потенціалу в системі для часу $t = 0,01$ с у системі із радіусом катоду 2 см.

При баластному опорі в 6 кОм, тиску $p = 1$ торр і всіх досліджених значеннях напруги у системі спостерігається аномальний ТР. Перейти до нормального режиму можна, збільшивши значення баластного опору (зниження значення прикладеної напруги призведе до того, що вона буде нижче за потенціал запалювання, і пробою не відбудеться), але так як ми мали на меті не детальне вивчення саме нормального ТР, а дослідження поведінки ТР при зміні геометрії електродів, отримані результати є задовільними. Зі збільшенням відстані між електродами баластний опір в колі має також збільшуватися.

В цілому, поведінка аномального ТР абсолютно типова і повністю узгоджується з теорією: при зростанні прикладеної напруги прикатодне падіння потенціалу також поступово зростає, і в залежності від значення прикладеної напруги складає від 315 до 378 В (Рисунок 4.14, а-д). На Рисунку 4.15 можна побачити розподіл потенціалу вздовж радіусу системи на висоті 8 мм.

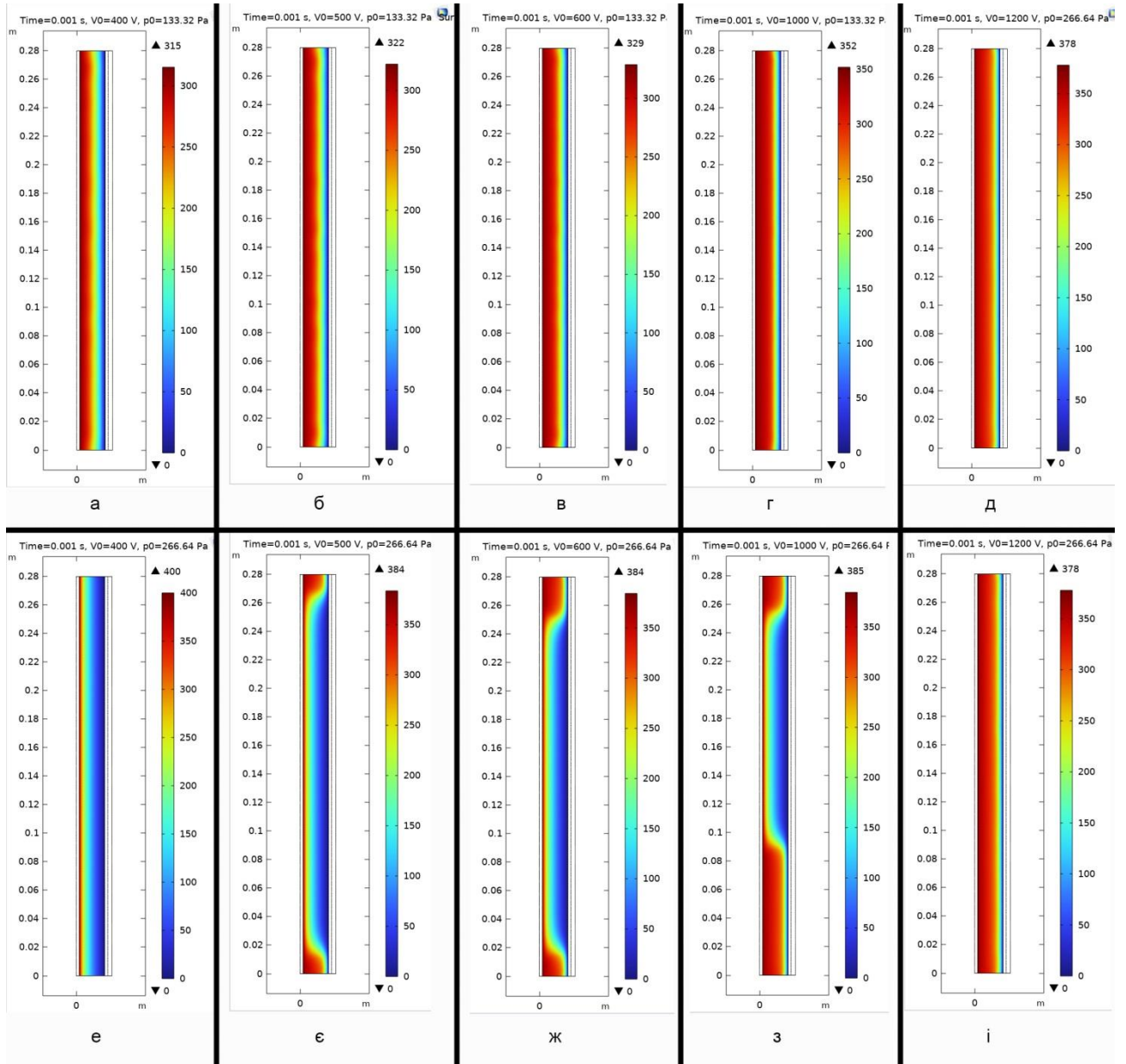


Рисунок 4.14 – Профілі розподілу потенціалу для системи з радіусом катоду 2 см ($p = 1$ торр: $V_0 = 400$ В (а), 500 В (б), 600 В (в), 1000 В (г), 1200 В (д); $p = 2$ торр: $V_0 = 400$ В (е), 500 В (е), 600 В (ж), 1000 В (з), 1200 В (и))

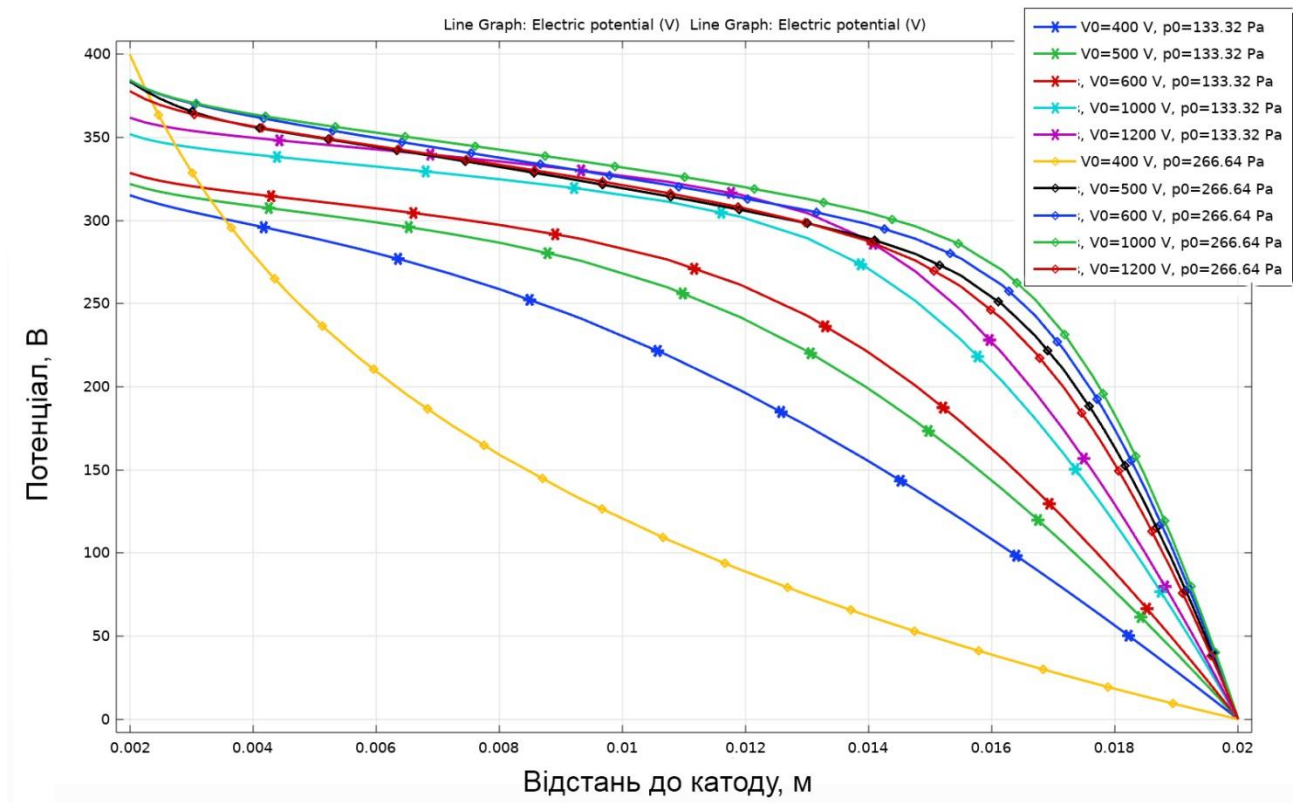


Рисунок 4.15 – Розподіли потенціалу вздовж радіусу системи на висоті 8 мм

У випадку з $p = 2$ торр результати були отримані більш цікаві результати. В цьому випадку добуток pd збільшився вдвічі і склав 4 см·торр, відповідно суттєво підвищився і потенціал запалювання, згідно до кривої Пашена. На Рисунку 4.14, є можна побачити, що за прикладеної напруги в 400 В пробій не відбувся. На Рисунку 4.15 видно, як суттєво відрізняється розподіл потенціалу вздовж радіусу системи в такому випадку.

На Рисунку 4.14, є-з представлено типову картину нормального ТР, прикатодне падіння напруги складає 384-385 В, і зі збільшенням прикладеної напруги зростає площа катодної плями. При значенні прикладеної напруги в 1200 В відбувається перехід ТР в аномальний режим (Рисунок 4.14, і).

Порівнюючи Рисунки 4.12 і 4.14, можна помітити, що прикатодне падіння потенціалу у випадку, коли pd дорівнює 1 см·торр при нормальному ТР становить ~ 325 В, а при $pd = 2$ см·торр – ~ 305 В. У випадку, коли $pd = 4$ см·торр, значення прикатодного падіння у нормальному режимі горіння суттєво

збільшується, і становить ~ 385 В. Це цілком узгоджується з теоретичними даними [16, 44].

Підсумовуючи, можна сказати, що зі збільшенням відстані між електродами зростає і потенціал запалювання. Таким чином, при обробці трубок потрібно враховувати їхній діаметр і, відштовхуючись від цього, обирати джерело живлення достатньої потужності, щоб пробій газу відбувся. При цьому величина баластного опору має також збільшуватися при збільшенні прикладеної напруги.

4.2.2 Розподіл густини частинок (електрони, позитивні і негативні іони)

Розглянемо розподіли густини частинок (електронів та позитивних і негативних іонів) вздовж радіусу системи. Для радіуса катоду 1 см маємо розподіли, представлені на Рисунках 4.16 (тиск 1 торр) і 4.17 (тиск 2 торр).

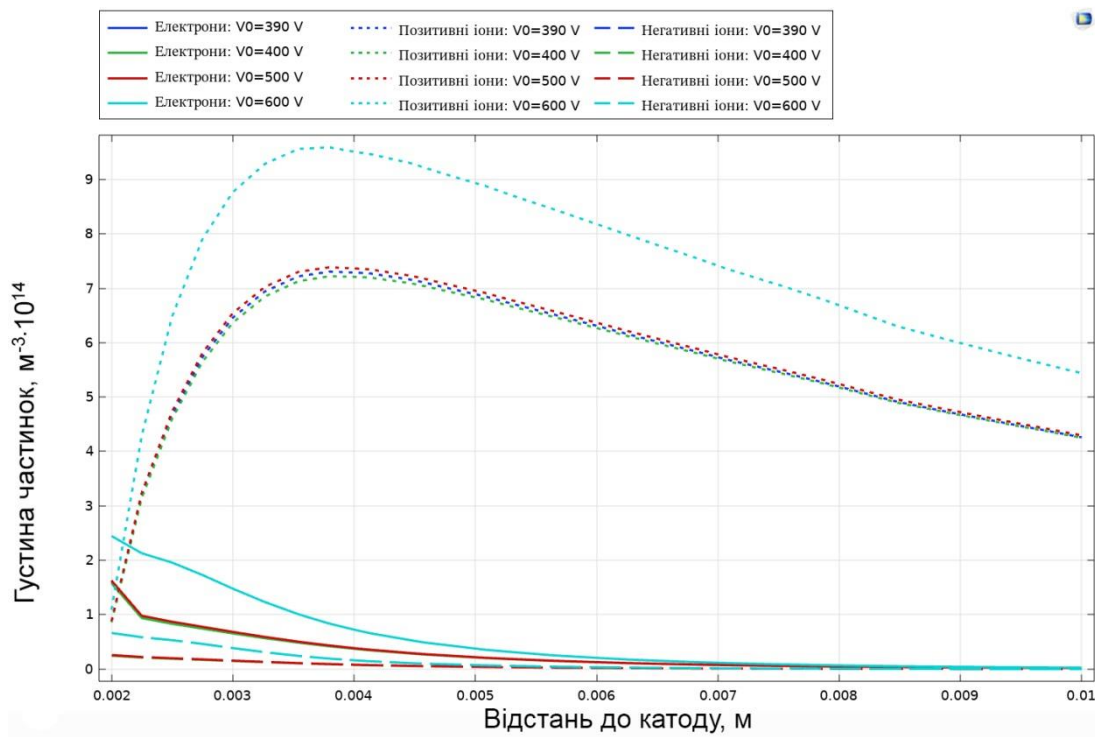


Рисунок 4.16 – Розподіл густини частинок вздовж радіусу системи 1 см для $p = 1$ торр

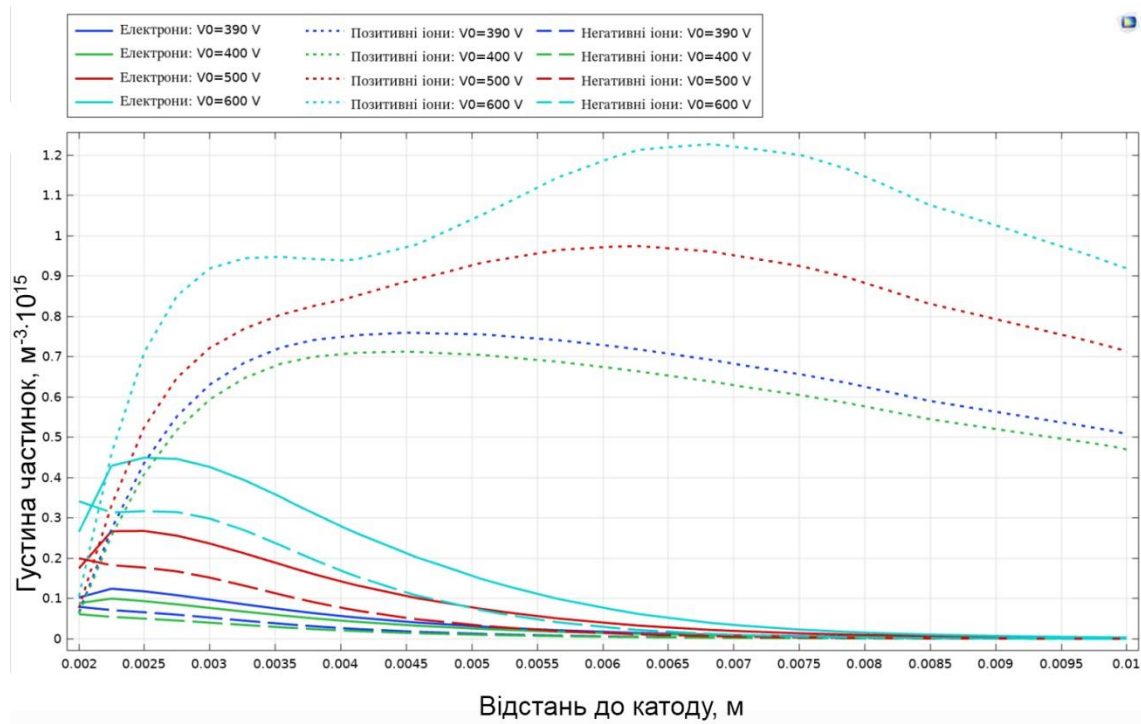


Рисунок 4.17 – Розподіл густини частинок вздовж радіуса системи 1 см для $p = 2$ торр

Як було відмічено раніше, при значеннях V_0 в 390 і 400 В в системі спостерігається нормальний ТР.

Як видно з Рисунку 4.16, для значення тиску в $p = 1$ торр при нормальному режимі ТР густина електронів і негативних іонів майже не змінюється в залежності від прикладеної напруги (тому що різниця в 10 В не є достатньо великою), а густина позитивних іонів зменшується з її підвищенням. При аномальному режимі спостерігається збільшення густини частинок всіх типів, при чому, густина позитивних іонів починає збільшуватися зі збільшенням прикладеної напруги.

На рисунку 4.17 можна побачити, що для тиску в 2 торр спостерігаються ті ж самі залежності: зі збільшенням прикладеної напруги в нормальному режимі густина частинок зменшується, а в аномальному режимі – збільшується. При цьому в аномальному режимі в області темного фарадеевого простору і від'ємного свічення зберігається зарядова нейтральність: сума негативних іонів і електронів приблизно дорівнює кількості позитивних іонів. Таке

співвідношення характерне для рівноважної плазми, у який зберігається термодинамічна рівновага.

Розподіли густин частинок для радіусу катоду 2 см наведено на Рисунках 4.18 (1 торр) і 4.19 (2 торр).

Для тиску в 1 торр при всіх значеннях напруги спостерігається аномальний режим. Для тиску 2 торр при напрузі 400 В розряд не запалювався, при 500-1000 В горів в нормальному режимі, при 1200 В переходив в аномальний ТР.

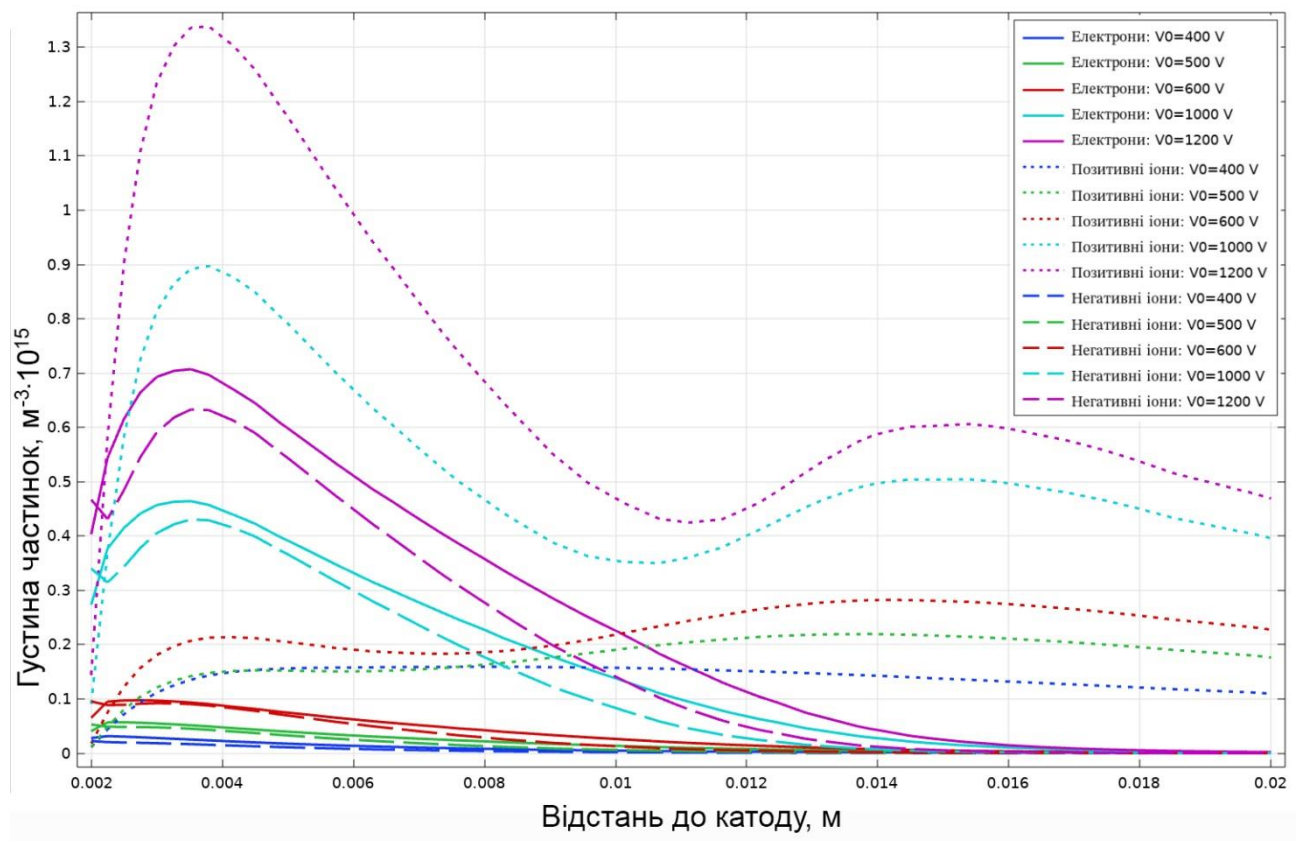


Рисунок 4.18 – Розподіл густини частинок вздовж радіуса системи 2 см для $p = 1$ торр

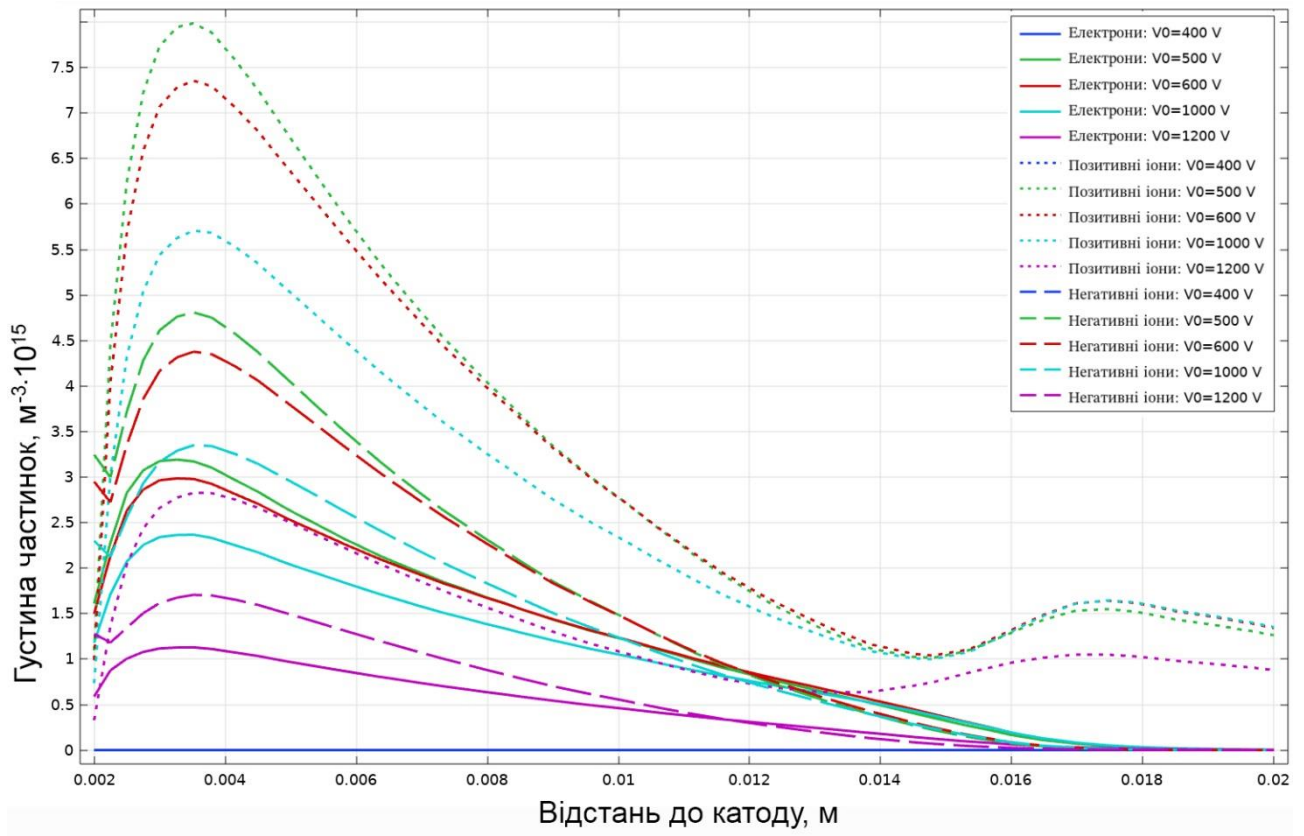


Рисунок 4.19 – Розподіл густини частинок вздовж радіуса системи 2 см для $p = 2$ торр

Рисунки 4.18 і 4.19 підтверджують отримані раніше тенденції відносно змін густини частинок в залежності від прикладеної напруги для нормального і аномального режимів.

Зменшення густини частинок при збільшенні прикладеної напруги в нормальному режимі можна пояснити тим, що за таких умов збільшується область, в якій відбуваються зіткнення електронів та іонів з молекулами газу, а отже зменшується енергія цих зіткнень, що в результаті призводить до зменшення густини електронів і іонів. При переході до аномального режиму розширення області зіткнень стає неможливим, а отже, зі збільшенням прикладеної напруги збільшується і енергія зіткнень, і загальна кількість іонів і електронів зростає.

Порівнюючи графіки для різних значень радіусу катода, можна зробити висновок, що зміна геометрії не чинить суттєвого впливу на густину електронів

і іонів в ТР. Зміни густин зазначених частинок залежать від величини прикладеної напруги і режиму горіння ТР.

4.2.3 Електронний струм на катоді

Розглянемо вплив зміни радіусу системи на густину електронного струму на катоді. На Рисунках 4.20-4.23 представлено розподіли електронного струму вздовж катода при різних значеннях тиску і відстанях між електродами.

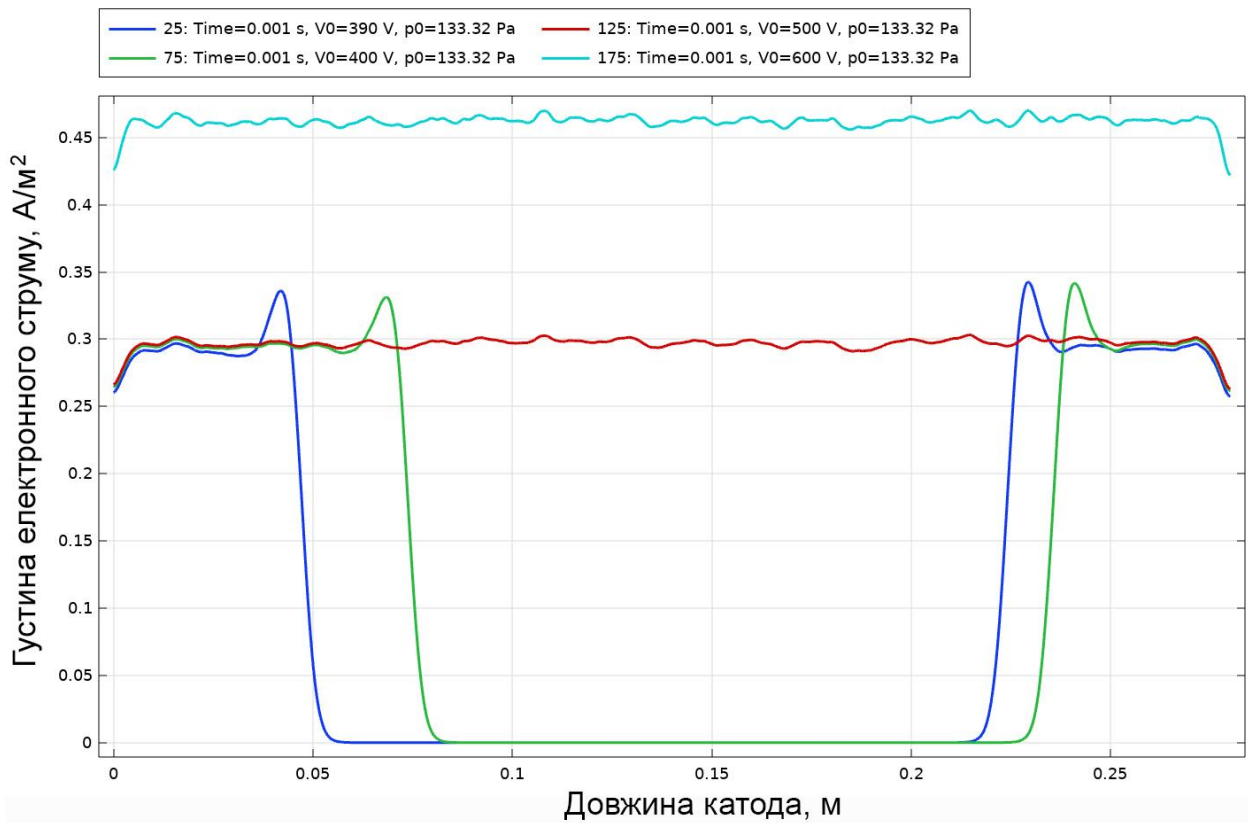


Рисунок 4.20 – Розподіл густини електронного струму вздовж катода для системи електродів з радіусом катода 1 см при тиску 1 торр

На Рисунку 4.20 можна побачити, що в нормальному режимі на катоді утворюються дві катодні плями з країв системи. Це можна пояснити тим, що концентрація електронів з країв системи більше, ніж всередині, і через те, що довжина електродів набагато більше відстані між ними, струмові плями

утворюються одночасно в двох місцях з максимальною концентрацією електронів. В аномальному режимі струмова пляма займає всю площину катоду, як це і передбачається теоретичними основами горіння ТР. При подальшому збільшенні прикладеної напруги зростає і густина струму на катоді.

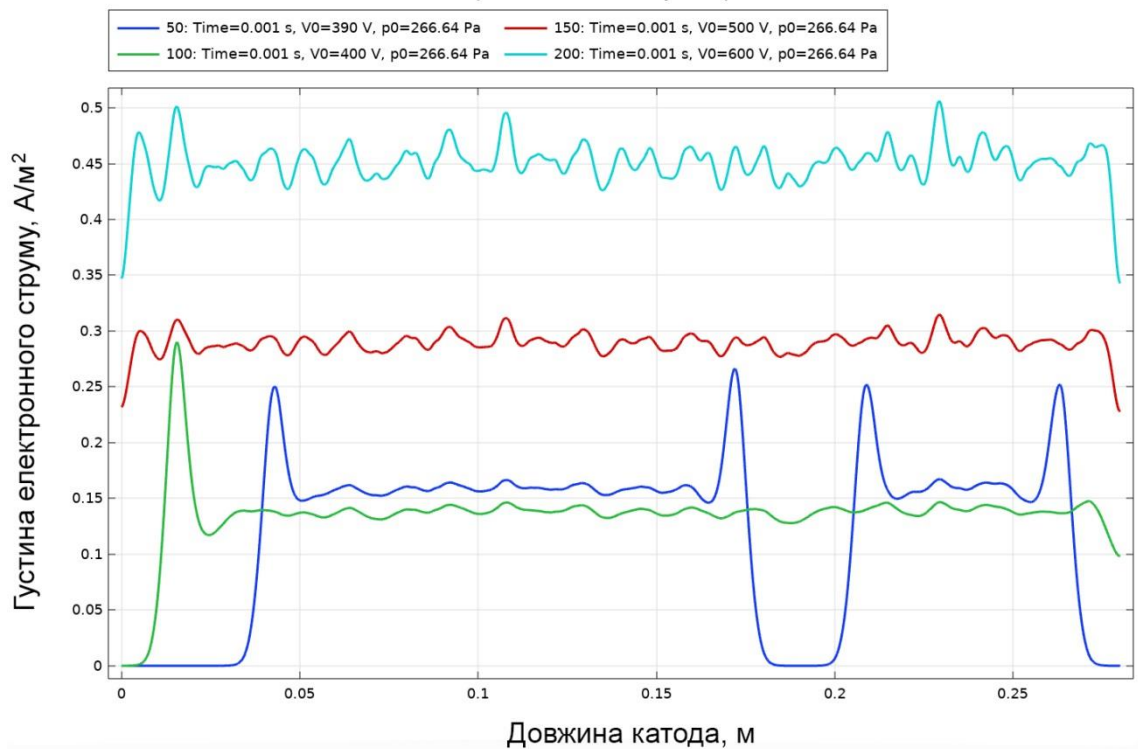


Рисунок 4.21 – Розподіл густини електронного струму вздовж катода для системи електродів з радіусом катода 1 см при тиску 2 торр

При тиску в 2 торр (Рисунок 4.21) і прикладеній напрузі в 390 В катодних плями знову дві, але вже при 400В утворюється одна катодна пляма, яка охоплює майже всю площину катоду. При цьому густина струму в нормальному режимі вдвічі менше за густину струмі при тих же значеннях напруги, але з тиском в 1 торр. З більшими значеннями прикладеної напруги розряд стає аномальним, і густина струму зростає зі збільшенням напруги.

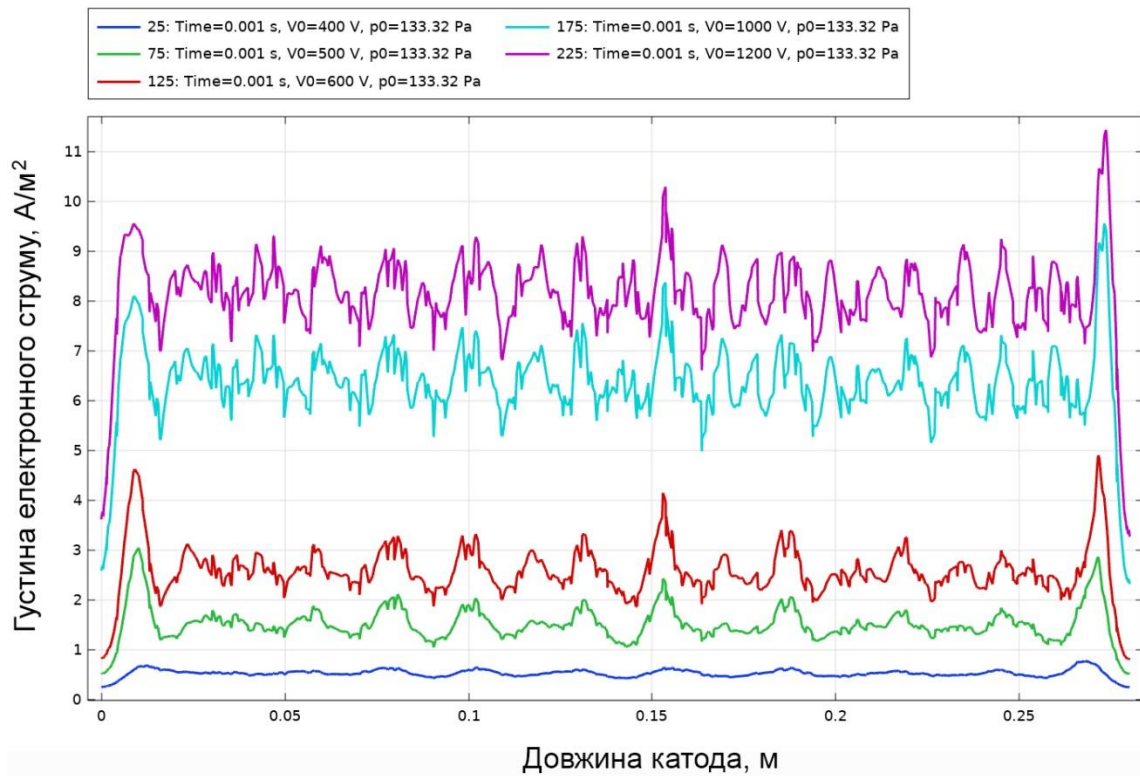


Рисунок 4.22 – Розподіл густини електронного струму вздовж катода для системи електродів з радіусом катода 2 см при тиску 1 торр

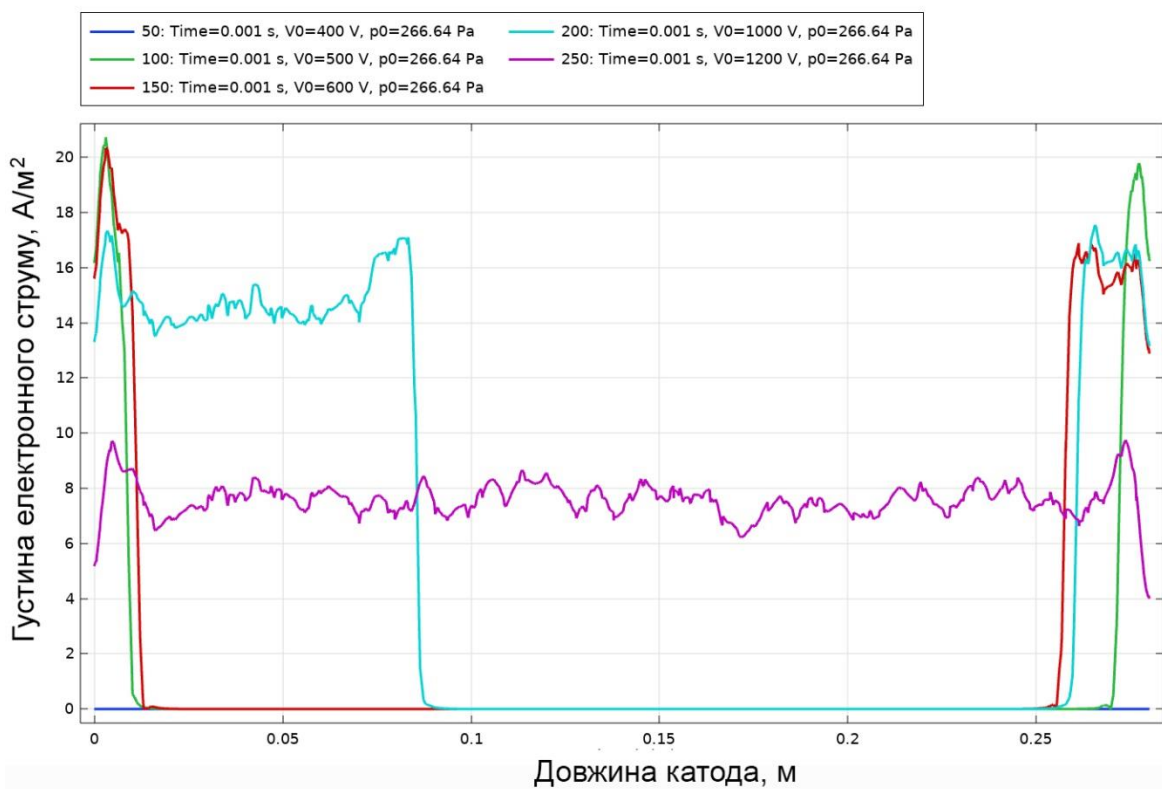


Рисунок 4.23 – Розподіл густини електронного струму вздовж катода для системи електродів з радіусом катода 2 см при тиску 2 торр

На Рисунках 4.22 і 4.23 можна побачити, що густина струму в системі з радіусом катоду 2 см суттєво збільшується у порівнянні з системою, в якій радіус катоду дорівнює 1 см. Можливо, це пов'язано з недостатньо великим обраним баластним опором, однак і при заданих умовах густина струму вкладається в діапазон коректних значень для ТР.

Для порівняння результатів було також проведено розрахунки для баластного опору 4 кОм, дані представлено у Таблиці 4.3. Можна побачити, що при аномальному ТР середні значення густин струму зменшуються при збільшенні баластного опору, а при нормальному ТР середні значення густини струму відрізняються несуттєво. В подальшому має сенс дослідити поведінку нормального і аномального ТР при збільшенні баластних опорів.

Нерівномірності на графіках в умовах експерименту пояснюються неідеальним станом поверхні катода (подряпини, нерівності тощо), а у випадку моделювання їх можна пояснити недоліками кінцево-різницевої сітки.

Таким чином, при зміні відстані між електродами збільшується і густина струму на катоді. Припускаємо, що густину струму на катоді при збільшенні радіусу системи можна зменшити, додавши більші баластні опори, однак це вимагає додаткових досліджень.

Таблиця 4.3 – Порівняння густин електронного струму для системи з радіусом катода 2 см з баластними опорами 4 і 6 кОм

Баластний опір R_b , кОм	Тиск газу p , торр	Прикладена напруга U , В	Густина струму плями на катоді, А/м ²	Опис результату
4	1	390	0,6...1,2	АТР
		400	0,7...1,6	АТР
		500	1,7...4,6	АТР
		600	3,3...6,6	АТР
	2	390	-	Не горить, напруга менше потенціалу запалювання
		400	-	Не горить, напруга менше потенціалу запалювання
		500	14...20	НТР, дві плями біля торців
		600	14...20	НТР, три плями (біля торців і майже в центрі)
6	1	400	0,43...0,67	АТР
		500	1,1...3	АТР
		600	2...4,5	АТР
		1000	5...8,5	АТР
		1200	7...11	АТР
	2	400	-	Не горить, напруга менше потенціалу запалювання
		500	16...20	НТР, дві плями біля торців
		600	16...20	НТР, дві плями біля торців
		1000	14...17	НТР, дві плями біля торців
		1200	6,5...9,8	АТР

4.3 Рекомендації для практичного застосування і подальших досліджень

В зв'язку із проведеним дослідженням ТР в коаксіальній системі електродів з різними параметрами, можна сформулювати ряд рекомендацій для застосування отриманих результатів та подальших наукових досліджень.

Ефективне використання баластних опорів може вплинути на густину електронного струму на катоді та розподіл частинок у розряді. Проведені розрахунки показали, що збільшення баластного опору може призводити до зменшення густини струму, зокрема, у аномальному режимі ТР. Рекомендується провести додаткові дослідження, зокрема, щодо впливу баластних опорів на інші параметри розряду та на його стабільність.

Розроблені моделі враховують геометрію газорозрядної системи, проте для практичного застосування рекомендується провести додаткові експерименти та моделювання з більшою кількістю різних конфігурацій електродів. Врахування впливу різних форм та розмірів електродів, а також відстаней між ними, може допомогти оптимізувати параметри системи для досягнення кращої продуктивності та стабільності розряду.

Проведені дослідження базуються на використанні азоту як газу для вивчення ТР. Рекомендується розширити область досліджень на інші гази, щоб вивчити їхню поведінку в газорозрядних системах та з'ясувати можливі варіації параметрів розряду.

У даній роботі зазначено, що нерівномірності на графіках можуть бути пов'язані з неідеальним станом поверхні катода (недостатньо точною кінцево-різницевою сіткою). Рекомендується уточнити модель для більш точного аналізу результатів.

Також отримані результати досліджень можуть мати практичне застосування в різних галузях, таких як освітлення, електроніка, технології

обробки матеріалів тощо. Рекомендується провести подальші експерименти для адаптації отриманих знань до конкретних технічних задач та визначення можливих областей застосування.

Дослідження ТР, зокрема впливу на нього геометрії системи, може знайти застосування в розвитку нових освітлювальних технологій. Ефективне управління ТР може призвести до створення більш енергоефективних джерел світла.

Врахування параметрів розряду при проектуванні та виготовленні електронних пристроїв може сприяти покращенню їхньої ефективності та стабільності. Оптимізація газорозрядних систем може бути корисною для розробки нових електронних компонентів та джерел живлення.

Використання газорозрядного розряду у технологіях обробки матеріалів може призвести до створення більш точних та контрольованих методів обробки. Розуміння впливу різних параметрів на розряд дозволяє розробляти більш ефективні процеси обробки матеріалів.

Висновки до Розділу 4

1. Розроблена в COMSOL Multiphysics комп'ютерна модель має деякі спрощення у порівнянні з реальним зразком, однак математична модель, на основі якої вона створена, максимально точно враховує всі аспекти, що надає можливість чисельного моделювання та аналізу ТР у азоті в коаксіальній системі електродів з урахуванням впливу різноманітних факторів.
2. Виявлено, що зі збільшенням відстані між електродами зростає потенціал запалювання, що може бути важливим у регулюванні умов розряду. Густина частинок та електронного струму також змінюються в залежності від параметрів системи. Результати надають важливі вказівки для оптимізації умов виникнення розрядів в азоті та можуть бути використані для подальших наукових досліджень та практичних застосувань в різних галузях.
3. Загальна мета практичного застосування отриманих результатів полягає в розробці нових технологій та методів, які сприятимуть покращенню ефективності, стабільності та енергоефективності різних технічних процесів. Додаткові експерименти та дослідження можуть допомогти конкретизувати можливості використання цих результатів в реальних технічних задачах.

ВИСНОВКИ

Згідно до поставлених задач дослідження впливу геометрії коаксіальних електродів на характеристики тліючого розряду в азоті, в рамках даної роботи:

1. Здійснено глибокий аналіз історії газових розрядів, особливостей тліючого розряду в азоті та коаксіальних систем електродів. Вивчено процеси в плазмі розрядів та умови переходу від несамостійного до самостійного газового розряду. Класифікація та застосування газових розрядів систематизовані з урахуванням їхніх основних характеристик.
2. Вивчено основні властивості тліючого розряду, його поведінку в азотному середовищі та параметри, що впливають на розряд. Ретельний аналіз досліджень визначив ключові аспекти в цій області, що визначаються властивостями тліючого розряду.
3. Визначено, що комп'ютерне моделювання є ефективним інструментом для дослідження газорозрядних процесів. Висвітлено вибір програмного забезпечення та представлено математичну модель для дослідження тліючого розряду в коаксіальній системі електродів.
4. Описано модель, розроблену в середовищі COMSOL Multiphysics, представлено отримані результати комп'ютерного моделювання та їх аналіз. Проведено верифікацію розробленої моделі. Сформульовано рекомендації для практичного застосування результатів та вказано напрямки подальших досліджень у галузі газорозрядних процесів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Crookes W. On Radiant Matter. Lecture delivered before the British Association for the Advancement of Science, at Sheffield, Friday, 22 August 1879. *The Popular Science Monthly*. 1880. Vol. 16. P. 157–167.
2. Outerbridge A. E., Jr A Fourth State of Matter. Lecture delivered before the Franklin Institute, 17 February 1881. *Journal of the Franklin Institute of the State of Pennsylvania*. 1881. Vol. 81. P. 287–297.
3. L'Annunziata M. F. Radioactivity: Introduction and History, from the Quantum to Quarks. Elsevier Science & Technology Books, 2016. 932 p.
4. Pidvalna U., Plyatsko R., Lonchyna V. IVAN PULUJ AND THE DISCOVERY OF X-RAYS. *Proceedings of the Shevchenko Scientific Society. Medical Sciences*. 2021. Vol. 64, no. 1. URL: <https://doi.org/10.25040/ntsh2021.01.18> (date of access: 29.09.2023).
5. Пулюй І. Збірник праць. Київ : Рада, 1996. 710 с.
6. Glasser O. Wilhelm Conrad Röntgen and the early history of the Roentgen rays. London : Bale & Danielsson, 1933. 494 p.
7. Raith W., Mulvey T. Constituents of Matter: Atmos, Molecules, Nuclei, and Particles. CRC, 2001. 902 p.
8. Gupta M. C. Atomic and Molecular Spectroscopy. New Age International (P) Ltd., 2001.
9. Tal'roze V. L., Ljubimova A. K. Secondary processes in the ion source of a mass spectrometer (presented by academician N.N. Semenov 27.08.1952) – reprinted from report of the Soviet Academy of Sciences, Vol. LXXXVI, No. 5 (1952). *Journal of Mass Spectrometry*.

1998. Vol. 33, no. 6. P. 502–504. URL: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9888\(199806\)33:6%3C502::aid-jms685%3E3.0.co;2-#](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9888(199806)33:6%3C502::aid-jms685%3E3.0.co;2-#) (date of access: 29.09.2023).
- 10.Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах / ред. М. Рабинович ; пер. з англ. М. М. Савченко, А. Франк. Москва : Мир, 1969. 206 с.
- 11.Шишкин Г. Г., Шишкин А. Г. Электроника : Учебник для ВУЗов. Москва : Дрофа, 2009. 703 с.
- 12.Елецкий А. В. Газовый разряд. Москва : Знание, 1981. 63 с.
- 13.Golant V. E. Газовый разряд на сверхвысоких частотах. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk.* 1958. Т. 65, № 5. С. 39–86. URL: <https://doi.org/10.3367/ufnr.0065.195805b.0039> (дата звернення: 29.09.2023).
- 14.Хот А., Мейеранд Р., Смит Д. Пробой в газах под действием светового излучения. - В кн.: Действие лазерного излучения. *Действие лазерного излучения* / ред. Ю. П. Райзер. Москва, 1968. С. 42–51.
- 15.Бушер Г., Томлинсон Р., Дамон Е. Частотная зависимость пробоя в газах, вызванного световым лучом.- В кн.: Действие лазерного излучения. *Действие лазерного излучения* / ред. Ю. П. Райзер. Москва, 1968. С. 32–36.
- 16.Райзер Ю. П. Физика газового разряда. 2-ге вид. Москва : Наука, 1992. 536 с.
- 17.Лебедев В. Электричество, магнетизм и электротехника в их историческом развитии. Дофарадеевский период. Москва – Ленинград : ОНТИ НКТП СССР, 1937. 177 с.
- 18.Кудрявцев С. П. Д. Д. Томсон : Люди науки. Москва : Просвещение, 1986. 80 с.

19. Faraday M. *Experimental Researches In Electricity*. 2nd ed. London : Richard And John Edward Taylor, 1849. Vol. 1. § 1417
20. Faraday M. *Experimental Researches In Electricity*. 2nd ed. London : Richard And John Edward Taylor, 1849. Vol. 1. § 1480
21. Академик В. В. Петров. 1761-1834. К истории физики и химии в России в начале XIX в. / ред. С. И. Вавилов. Москва - Ленинград : АН СССР, 1940. 210 с.
22. Thomson J. J. On a theory of the electric discharge in gases. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1883. Vol. 15, no. 96. P. 427–434. URL: <https://doi.org/10.1080/14786448308627378> (date of access: 29.09.2023).
23. Thomson J. J. Cathode Rays. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1897. Vol. 44, no. 269. P. 293–316. URL: <https://doi.org/10.1080/14786449708621070> (date of access: 29.09.2023).
24. Thomson J. J. The Effect of Röntgen Rays on Liquid and Solid Insulators. *Nature*. 1897. Vol. 55, no. 1435. P. 606. URL: <https://doi.org/10.1038/055606a0> (date of access: 22.09.2023).
25. Thomson J. J. Cathode Rays. *The Electrician*. 1897. Vol. 39. P. 104–109.
26. Газовый разряд. Плазма – Москва: МИФИ, 2006
27. Кудрявцев П. С. История физики. Москва : Просвещение, 1971. Т. 3 : От открытия квант до квантовой механики. 422 с.
28. Townsend J. *The theory of ionization of gases by collision*. London : Constable & Company, ltd., 1910. 88 p.
29. Townsend J. S. *Electricity in gases*. Oxford : Clarendon Press, 1915. 496 p.

30. Townsend J. Die Ionisation der Gase. Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft, 1924. Bd. 2. 473 S.
31. Rogovskii V. О зажигании газового разряда. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk.* 1933. Т. 13, № 4. С. 593–611. URL: <https://doi.org/10.3367/ufnr.0013.193304f.0593> (дата звернення: 30.09.2023).
32. Rogowski W. Empfindlicher Kaltkathodenzillograph. *Die Naturwissenschaften.* 1933. Bd. 21, Nr. 16. S. 300. URL: <https://doi.org/10.1007/bf01490937> (Zugriff am: 30.09.2023).
33. Rogowski W. Die Schwärzung photographischer Schichten beim Kathodenzillographen. *Archiv für Elektrotechnik.* 1932. Bd. 26, Nr. 2. S. 133–134. URL: <https://doi.org/10.1007/bf01657117> (Zugriff am: 30.09.2023).
34. Richardson O. W. The emission of electricity from hot bodies. 2nd ed. London : Longmans, Green and co., 1921.
35. Langmuir I. The Interaction of Electron and Positive Ion Space Charges in Cathode Sheaths. *Physical Review.* 1929. Vol. 33, no. 6. P. 954–989. URL: <https://doi.org/10.1103/physrev.33.954> (date of access: 30.09.2023).
36. Langmuir I. The Effect of Space Charge and Initial Velocities on the Potential Distribution and Thermionic Current between Parallel Plane Electrodes. *Physical Review.* 1923. Vol. 21, no. 4. P. 419–435. URL: <https://doi.org/10.1103/physrev.21.419> (date of access: 30.09.2023).
37. Langmuir I. The Electron Emission from Thoriated Tungsten Filaments. *Physical Review.* 1923. Vol. 22, no. 4. P. 357–398. URL: <https://doi.org/10.1103/physrev.22.357> (date of access: 30.09.2023).
38. Langmuir I. Kinetic Theory and Electric Conduction through Gases. *Nature.* 1929. Vol. 123, no. 3105. P. 675–676. URL: <https://doi.org/10.1038/123675a0> (date of access: 30.09.2023).

39. Бобровников Л. З. Электроника : Учебник для вузов. 5-е вид. Санкт-Петербург : Питер, 2004. 560 с.
40. Чистяков П. Н. Конспект лекций по физической электронике – Часть 1. Москва : МИФИ, 1977. 116 с.
41. Королев Ю. Элементарные и кинетические процессы в газоразрядной плазме : учебное пособие. Томск : Издательство Томс. политехничес. университета, 2008. 128 с.
42. Светцов В. И. Вакуумная и плазменная электроника : Учебное пособие. Иваново : Ивановс. государственный химико-технологичес. университет, 2003. 172 с.
43. Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. Москва ; Ленинград, 1947. 808 с.
44. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. Москва : Наука, 1971. 490 с.
45. Чистяков П. Н. Конспект лекций по физической электронике – Часть 2. Москва : МИФИ, 1977. 92 с.
46. Газовый разряд. Плазма – Москва: МИФИ, 2006.
47. Кондратьев В. Н. Кинетика химических газовых реакций. Москва : АН СССР, 1958. 688 с.
48. Weissler G. L., Schindler M. An Estimate of the Energies of the Positive Ions in a Negative Point-to-Plane Corona. *Journal of Applied Physics*. 1952. Vol. 23, no. 8. P. 844–846. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1702317> (date of access: 30.09.2023).
49. Contributors to Wikimedia projects. Тлеющий разряд – Википедия. *Википедия – свободная энциклопедия*. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Тлеющий_разряд (дата звернения: 07.12.2023).

50. Hippler R., Pfau S., Schmidt M., Schoenbach K.H. (Eds) Low temperature plasma physics (Fundament aspects and applications) WILEY-VCH, 2001. 523 p.
51. Konuma M. Plasma techniques for film deposition. Alpha Science International Ltd. Germany. 2005. 337p.
52. ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ И ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВКАХ / С.К. Жданов, В.А. Курнаев, М.К. Романовский, И.В. Цветков; Под ред. В.А. Курнаева. М: МИФИ, 2007. 368 с.
53. Cicala G. et al. Study of positive column of glow discharge in nitrogen by optical emission spectroscopy and numerical simulation. *Plasma Sources Science and Technology*. 2009. Т. 18. №. 2. P. 25-32.
54. Saady M. A. DC pseudo-glow discharge in nitrogen gas. *Plasma Devices and Operations*. 2009. Т. 17. №. 1. P. 88-96.
55. Arzamasov B. N., Panajoti T. A. A role of specific discharge power in the ion thermochemical treatment of the alloys. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2000. С. 31-34.
56. Akhmadeev Y. K. Nitriding of Technical-Purity Titanium in Hollow-Cathode Glow Discharge. *Technical Physics Letters*. 2005. Vol. 31, no. 7. P. 548. URL: <https://doi.org/10.1134/1.2001050> (date of access: 12.11.2023).
57. Akhmadeev Y. K. Nitriding of Technical-Purity Titanium in Hollow-Cathode Glow Discharge. *Technical Physics Letters*. 2005. Vol. 31, no. 7. P. 548. URL: <https://doi.org/10.1134/1.2001050> (date of access: 12.11.2023).
58. Diagnostics of N₂ dissociation in RF plasmas by vacuum ultraviolet emission and absorption spectroscopy / T. Kitajima et al. *Plasma Sources Science and Technology*. 2008. Vol. 17, no. 2. P. 024018.

- URL: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/17/2/024018> (date of access: 12.11.2023).
59. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge University Press, 2008.
60. Tsendin L. D. Nonlocal electron kinetics in gas discharge plasma. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2010. Vol. 180, no. 2. P. 139. URL: <https://doi.org/10.3367/ufnr.0180.201002b.0139> (date of access: 12.11.2023).
61. Kudryavtsev A. A., Morin A. V., Tsendin L. D. Role of nonlocal ionization in formation of the short glow discharge. *Technical Physics*. 2008. Vol. 53, no. 8. P. 1029–1040. URL: <https://doi.org/10.1134/s1063784208080100> (date of access: 12.11.2023).
62. Diagnostics of N₂ dissociation in RF plasmas by vacuum ultraviolet emission and absorption spectroscopy / T. Kitajima et al. *Plasma Sources Science and Technology*. 2008. Vol. 17, no. 2. P. 024018. URL: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/17/2/024018> (date of access: 12.11.2023).
63. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Арзамасов Б. та ін. Москва : Издательство МГТУ им Н. Э. Баумана, 1999. 400 с.
64. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали. Москва : Машиностроение, 1976. 256 с.
65. Каплун В. Г., Каплун П. В. Прогрессивные технологии упрочнения поверхности конструктивных элементов. *Современные технологии в машиностроении : сборник науч. ст.* / ред. А. И. Грабченко. Харьков, 2007. С. 388–422.
66. Каплун В. Г. Особенности формирования диффузионных слоев при ионном азотировании в безводородных средах. *Физическая инженерия поверхности*. 2003. Т. 1, № 2. С. 141–146.

67. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. Харьков: НЕЦ ХФТИ, 2006. 364 с.
68. Неровный В., Перемитько В. Азотирование поверхности титановых сплавов дуговой плазмой низкого давления. *ФХОМ*. 1995. №3. С.49-54.
69. Будилов В., Агзамов Р., Рамазанов К. Технология ионного азотирования в тлеющем разряде с полым катодом. *ФХОМ*. 2007. № 7. С. 25–29.
70. Rie K. T., Lampe T. Thermochemical surface treatment of titanium and titanium alloy Ti-6Al-4V by low energy nitrogen ion bombardment. *Materials Science and Engineering*. 1985. Vol. 69, no. 2. P. 473–481. URL: [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(85\)90349-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(85)90349-0) (date of access: 12.11.2023).
71. Азотирование конструкционных сталей в газовых разрядах низкого давления / П. Щанин та ін. *ФХОМ*. 2001. № 3. С. 16–19.
72. Influence of the magnetic field of the current passing through the anode on a glow discharge in a coaxial system / M. S. Melnichenko et al. *Problems of Atomic Science and Technology Series: Plasma Physics*. 2022. No. 6. P. 107–110.
73. Lisovsky V. A., Yakovin S. D. Scaling law for a low-pressure gas breakdown in a homogeneous DC electric field. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. 2000. Vol. 72, no. 2. P. 34–37. URL: <https://doi.org/10.1134/1.1312005> (date of access: 12.11.2023).
74. Chistyakov P.N. Scaling laws in the normal glow discharge in neon and argon. *Zhurn. Tekhn. Fiz.* 1971. Vol. 41, № 8. P. 1672-1674.
75. Korolev Yu.D. Interpretation of the phenomenon of constancy of the current density in the normal glow discharge. *Sov. Phys. Tech. Phys.* 1987. Vol.32, №2. P. 231-233.

76. Fujii K. Transition Mechanism from Townsend Discharge to Normal Glow Discharge. *Japanese Journal of Applied Physics*. 1974. Vol. 13, no. 3. P. 573–574. URL: <https://doi.org/10.1143/jjap.13.573> (date of access: 12.11.2023).
77. Ward A. L. Calculations of Cathode-Fall Characteristics. *Journal of Applied Physics*. 1962. Vol. 33, no. 9. P. 2789–2794. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1702550> (date of access: 12.11.2023).
78. Chistyakov P.N. Scaling laws in the normal glow discharge in neon and argon. *Zhurn. Tekhn. Fiz.* 1971. Vol. 41, № 8. P. 1672-1674.
79. Study of positive column of glow discharge in nitrogen by optical emission spectroscopy and numerical simulation / G. Cicala et al. *Plasma Sources Science and Technology*. 2009. Vol. 18, no. 2. P. 025032. URL: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/18/2/025032> (date of access: 12.11.2023).
80. Nemchinsky V. A method to decrease the normal current density at the cathode of a glow discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1993. Vol. 26, no. 4. P. 643–646. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/26/4/017> (date of access: 12.11.2023).
81. Takeishi Y. A Note on the Normal Cathode Fall in the Glow Discharges in Inert Gases. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1958. Vol. 13, no. 7. P. 767–768. URL: <https://doi.org/10.1143/jpsj.13.767> (date of access: 12.11.2023).
82. An T. N., Marode E., Johnson P. C. Monte Carlo simulation of electrons within the cathode fall of a glow discharge in helium. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1977. Vol. 10, no. 16. P. 2317–2328. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/10/16/022> (date of access: 12.11.2023).
83. Kulikovskiy A. A. Hydrodynamic description of electron multiplication in the cathode region: elementary beams model. *Journal of Physics D:*

- Applied Physics*. 1991. Vol. 24, no. 11. P. 1954–1963. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/24/11/009> (date of access: 12.11.2023).
84. Ward A. L. Effect of Space Charge in Cold-Cathode Gas Discharges. *Physical Review*. 1958. Vol. 112, no. 6. P. 1852–1857. URL: <https://doi.org/10.1103/physrev.112.1852> (date of access: 12.11.2023).
85. Naumov N. Y. The diffusion-ionization mechanism of the transverse propagation of Townsend and glow discharges and its influence on the stability and nature of a normal current density. *High Temperature*. 2015. Vol. 53, no. 3. P. 319–328. URL: <https://doi.org/10.1134/s0018151x15020194> (date of access: 12.11.2023).
86. Petrovic Z. L., Phelps A. V. Constrictions in cathode-dominated, low-pressure argon discharges. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1996. Vol. 24, no. 1. P. 107–108. URL: <https://doi.org/10.1109/27.491735> (date of access: 12.11.2023).
87. CCD images of low-pressure low-current DC discharges / Z. L. Petrovic et al. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2002. Vol. 30, no. 1. P. 136–137. URL: <https://doi.org/10.1109/tps.2002.1003961> (date of access: 12.11.2023).
88. Von Engel A., Emeleus K. G., Kennedy M. Radial coherence of the normal glow discharge. *Physics Letters A*. 1972. Vol. 42, no. 3. P. 191–192. URL: [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(72\)90855-9](https://doi.org/10.1016/0375-9601(72)90855-9) (date of access: 12.11.2023).
89. Boeuf J. A two-dimensional model of dc glow discharges. *Journal of Applied Physics*. 1988. Vol. 63, no. 5. P. 1342–1349. URL: <https://doi.org/10.1063/1.339961> (date of access: 12.11.2023).
90. Ohuchi M., Kubota T. Monte Carlo simulation of electrons in the cathode region of the glow discharge in helium. *Journal of Physics D*:

- Applied Physics*. 1983. Vol. 16, no. 9. P. 1705–1714. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/16/9/016> (date of access: 12.11.2023).
91. Den Hartog E. A., Doughty D. A., Lawler J. E. Laser optogalvanic and fluorescence studies of the cathode region of a glow discharge. *Physical Review A*. 1988. Vol. 38, no. 5. P. 2471–2491. URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.38.2471> (date of access: 12.11.2023).
92. Goto M., Kondoh Y. Monte Carlo Simulation of Normal and Abnormal Glow Discharge Plasmas Using the Limited Weight Probability Method. *Japanese Journal of Applied Physics*. 1998. Vol. 37, Part 1, No. 1. P. 308–312. URL: <https://doi.org/10.1143/jjap.37.308> (date of access: 12.11.2023).
93. Kudryavtsev A. A., Tsendin L. D. Townsend discharge instability on the right-hand branch of the Paschen curve. *Technical Physics Letters*. 2002. Vol. 28, no. 12. P. 1036–1039. URL: <https://doi.org/10.1134/1.1535495> (date of access: 12.11.2023).
94. Kudryavtsev A. A., Morin A. V., Tsendin L. D. Role of nonlocal ionization in formation of the short glow discharge. *Technical Physics*. 2008. Vol. 53, no. 8. P. 1029–1040. URL: <https://doi.org/10.1134/s1063784208080100> (date of access: 12.11.2023).
95. Moizhes B. Y., Nemchinsky V. A. On the theory of the retrograde motion of a vacuum arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1991. Vol. 24, no. 11. P. 2014–2019. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/24/11/016> (date of access: 12.11.2023).
96. Lister G. G. Low-pressure gas discharge modelling. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1992. Vol. 25, no. 12. P. 1649–1680. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/25/12/001> (date of access: 12.11.2023).

97. Лисовский В., Малиновский В., Деревянко В. Влияние диаметра плоских электродов на зажигание и горение разряда постоянного тока. *Journal of Kharkiv National University*. 2013. Т. 3, № 59. С. 65–73.
98. Майкут С. О. Фізико-топологічне моделювання приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля : дис. докт. філософії: 171 / Майкут Сергій Олексійович. Київ, 2020. 175 с.
99. Цибульский Л. Ю. Физико-топологическое моделирование индукционного испарителя металлов / Л. Ю. Цибульский. // Вісник Національного технічного університету України «КПІ» Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2015. – №63. – С. 107–118.
100. Комп'ютерне моделювання фізичних процесів. Створення та дослідження фізичних моделей чисельним методом: для студентів та аспірантів спеціальності 104 – «Фізика та астрономія», спеціалізації «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів» / В.Й. Котовський, Л.Ю. Цибульский; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 130 с.
101. COMSOL: Multiphysics Software for Optimizing Designs. *COMSOL*. URL: <https://www.comsol.com/> (date of access: 30.09.2023).
102. Lieberman M. A. Principles of plasma discharges and materials processing. 2nd ed. Hoboken, NJ : Wiley-Interscience, 2004. 757 p.
103. Kulikovskiy A. A. Positive streamer between parallel plate electrodes in atmospheric pressure air. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1997. Vol. 30, no. 3. P. 441–450. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/30/3/017> (date of access: 01.12.2023).

104. About the project. *About the project.* URL:
<https://fr.lxcat.net/home/> (date of access: 01.12.2023).

АНОТАЦІЯ

ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

СТУДЕНТА 2-го (МАГІСТЕРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ ГР. ОФ-21мп

Павшука Єгора Кириловича

(ПІБ)

На тему «Дослідження впливу геометрії коаксіальних електродів на характеристики тліючого розряду в азоті»

Науковий керівник доктор філософії, асистент кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів, Майкут Сергій Олексійович

(науковий ступінь, вчене звання, посада, ПІБ)

Актуальність Актуальність даного дослідження полягає в необхідності розуміння та оптимізації газорозрядних процесів, зокрема тліючого розряду в азоті з використанням коаксіальної системи електродів. Це дослідження має велике значення для розвитку нових технологій, таких як плазмові джерела світла, технології обробки матеріалів, та інших важливих виробничих процесів.

Вивчення впливу геометрії коаксіальних електродів на характеристики тліючого розряду може призвести до вдосконалення ефективності та стабільності таких систем. Результати цього дослідження можуть мати практичне застосування в різних галузях, включаючи освітлення, технологічні процеси, та виробництво електроніки.

Застосування комп'ютерних моделей у дослідженнях газорозрядних процесів важливо для швидкого та ефективного вивчення складних фізичних явищ. Цей підхід дозволяє здійснювати віртуальні експерименти та оптимізувати проекти без необхідності фізичного створення прототипів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами кафедри _____

«Технологія комбінованого лазерного та імпульсно плазмового нанесення зносостійких покриттів для зміцнення стволів вогнепальної зброї» – д/р № 0121U11822, дата реєстрації: 27-06-2021

Об'єкт дослідження тліючий розряд в азоті, нормальний та аномальний режими тліючого розряду в коаксіальній системі електродів.

Предмет дослідження зміни характеристик плазми тліючого розряду в азоті в коаксіальній системі електродів при різних тисках і радіусах системи.

Мета роботи Основною метою даної науково-дослідної роботи є вивчення впливу зміни геометрії коаксіальних електродів на характеристики тліючого розряду в азотному середовищі. Конкретні цілі включають аналіз основних властивостей тліючого розряду, дослідження його поведінки в азоті, вивчення особливостей коаксіальної системи електродів, а також розробку та верифікацію математичної моделі для комп'ютерного моделювання.

Методи дослідження **методи математичної фізики, математичне моделювання і чисельний розрахунок для дослідження тліючого розряду у двомірній моделі коаксіальної системи електродів.**

Відомості про обсяг звіту, кількість ілюстрацій, таблиць, додатків і літературних найменувань за переліком використаних **В роботі наведено: використаної літератури - 104, сторінок: - 126, рисунків - 36, таблиць - 6.**

Мета індивідуального завдання, використані методи та отримані результати _____

Головні цілі індивідуального завдання:

1. Провести хронологічне вивчення історії відкриття газових розрядів та внеску вчених у цей процес. Ознайомитися з фізичними процесами в плазмі газових розрядів і провести огляд сучасних теоретичних концепцій. Вивчити механізми та умови переходу від несамостійного до самостійного газового розряду.
2. Вивчити основні характеристики тліючого розряду. Дослідити поведінку тліючого розряду в азотному середовищі у тонких трубках. Вивчити особливості та параметри коаксіальних систем електродів, які використовуються для створення тліючого розряду. Здійснити аналіз наукових публікацій та досліджень, присвячених тліючому розряду.
3. Обґрунтувати вибір комп'ютерного моделювання як інструменту для наукових досліджень газорозрядних процесів. Описати використане програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання тліючого розряду в коаксіальній системі електродів. Описати математичну модель, яка використовується для комп'ютерного моделювання тліючого розряду в коаксіальній системі електродів.
4. Описати розроблену модель у середовищі COMSOL Multiphysics, вказавши всі вхідні параметри та вибрані області дослідження. Представити та проаналізувати отримані результати моделювання. Сформулювати рекомендації для можливого застосування отриманих результатів на практиці та вказати можливі напрямки для подальших наукових досліджень у даній області

Висновок **В рамках даного дослідження вивчено процеси в плазмі розрядів та умови переходу від несамостійного до самостійного газового розряду. Досліджено основні властивості тліючого розряду та його поведінку в азотному середовищі, визначено ключові параметри, що впливають на розряд. Встановлено, що комп'ютерне моделювання є ефективним інструментом для вивчення газорозрядних процесів, обґрунтовано вибір програмного забезпечення та надано математичну модель для моделювання тліючого розряду в коаксіальній системі електродів. Описано модель, розроблену в середовищі COMSOL Multiphysics, представлено отримані результати комп'ютерного моделювання та проведено їх аналіз. В результаті верифікації моделі сформульовано рекомендації для практичного використання отриманих результатів та вказано напрямки подальших досліджень у галузі газорозрядних процесів.**

Перелік ключових слів (не більше 20) тліючий розряд, коаксіальна система електродів, циліндрична система електродів, розряд в азоті, комп'ютерне моделювання, плазма розрядів, COMSOL Multiphysics

Підпис керівника _____



**SUMMARY
TO THE MASTER THESIS**

2nd YEAR STUDENT OF THE SECOND LEVEL OF HIGHER EDUCATION (MASTER LEVEL),

GR. OF-21mp

Yehor Pavshuk

(FULL NAME)

On the topic Investigation of the influence of the geometry of coaxial electrodes on the characteristics of a glow discharge in Nitrogen

Scientific supervisor a doctor of philosophy, assistant Maikut Serhii

(scientific degree, academic title, position, FULL NAME)

Actuality The relevance of this research lies in the necessity to understand and optimize gas discharge processes, particularly the glow discharge in nitrogen using a coaxial electrode system. This study is crucial for the development of new technologies, such as plasma light sources, material processing technologies, and other essential industrial processes.

Investigating the influence of the geometry of coaxial electrodes on the characteristics of the glow discharge can lead to improvements in the efficiency and stability of such systems. The findings of this research may find practical applications in various fields, including lighting, technological processes, and electronics manufacturing.

The application of computer models in the study of gas discharge processes is essential for the rapid and effective exploration of complex physical phenomena. This approach allows for virtual experiments and optimization of designs without the need for the physical creation of prototypes.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes of the department

«Technology of combined laser and pulsed plasma application of wear-resistant coatings for strengthening firearm barrels» – project No. 0121U111822, registration date: 06/27/2021

Object of research The glow discharge in nitrogen, normal and abnormal modes of the glow discharge in a coaxial electrode system.

Subject of research Changes in the characteristics of the plasma in the glow discharge in nitrogen in a coaxial electrode system at different pressures and system radii.

Purpose of work The main objective of this scientific research is to study the influence of changes in the geometry of coaxial electrodes on the characteristics of the glow discharge in nitrogen. Specific goals include the analysis of the basic properties of the glow discharge, investigation of its behavior in nitrogen, study of the features of the coaxial electrode system, and the development and verification of a mathematical model for computer simulation.

Research methods Methods of mathematical physics, mathematical modeling, and numerical calculations will be employed to investigate the glow discharge in a two-dimensional model of the coaxial electrode system.

Information about the volume of the thesis, the number of illustrations, tables, applications and references in the list of used ones The work contains: references - 104, pages: - 126, figures - 36, tables - 6.

The purpose of the individual task, the methods used and the results obtained _____

Main Objectives of the Individual Task:

1. Conduct a comprehensive study of the history of the discovery of gas discharges and the contributions of scientists to this process. Thoroughly investigate the physical processes in the plasma of gas discharges and provide an overview of modern theoretical concepts. Study the mechanisms and conditions of the transition from non-self-sustained to self-sustained gas discharge.

2. Examine the main characteristics of the glow discharge. Investigate the behavior of the glow discharge in a nitrogen environment. Study the features and parameters of coaxial electrode systems used to create the glow discharge. Analyze scientific publications and research dedicated to the glow discharge.

3. Justify the choice of computer modeling as a tool for scientific research on gas discharge processes. Describe the software used for computer modeling of the glow discharge in a coaxial electrode system. Develop and describe the mathematical model used for computer modeling of the glow discharge in a coaxial electrode system.

4. Describe the model developed in COMSOL Multiphysics, specifying all input parameters and selected areas of study. Present and analyze the results of modeling. Formulate recommendations for the practical application of the obtained results and suggest possible directions for further scientific research in this field.

Conclusion Within the scope of this study, plasma discharge processes and the transition conditions from non-self-sustained to self-sustained gas discharge have been investigated. The fundamental properties of the glow discharge and its behavior in a nitrogen environment have been explored, identifying key parameters influencing the discharge. Computer modeling has been established as an effective tool for studying gas discharge processes, with a rationale for software selection and a provided mathematical model for simulating the glow discharge in a coaxial electrode system. The model, developed in the COMSOL Multiphysics environment, is described, and the obtained results of computer simulation are presented and analyzed. Recommendations for practical application of the results and directions for further research in the field of gas discharge processes are formulated based on model verification.

Keyword list (no more than 20) glow discharge, coaxial system of electrodes, cylindrical system of electrodes, discharge in nitrogen, computer modeling, plasma discharges, COMSOL Multiphysics

Signature of the supervisor _____

