

УДК 537.525

АНДРІЄНКО О. В.

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

## УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ НА ОСНОВІ ТРИГОНОМЕТРИЧНОГО БАЗИСА

**Мета:** полягає в огляді та класифікації існуючих на даний момент моделей тліючого розряду за методом математичного опису процесів, тиску, типу газу та за геометрією електродів. Стаття спрямована на створення узагальненої моделі розряду, яка визначатиме вплив кожного параметру на характеристики розряду.

**Методика:** Для досягнення цілей дослідження були використані методи теоретичного аналізу наукових джерел, а також математичний метод для опису узагальненої моделі розряду на базі ортонормованого базису, зокрема тригонометричного базису.

**Результати:** Проведено огляд тліючого розряду, запропоновано класифікацію моделей за аналітичними методами в їх основі. Виокремлено вектор параметрів спільний для всіх моделей. Також при аналізі було проведено порівняння характеристик моделей у вигляді таблиці. Була запропонована узагальнена модель дослідження газових розрядів методом варіації параметрів за допомогою ортонормованих базисів. Як приклад наведено формування вектору змінних параметрів у тригонометричному базисі.

**Наукова новизна:** Стаття пропонує узагальнену модель розряду, яка оснований на істотній зміні кожного параметру як компоненти вектору ортонормованого базису, що впливає на характеристики розряду. Така модель дозволяє одночасно змінювати параметри моделі, накопичувати реакції на зміни параметрів у кожному випробуванні, а по завершенні за результатами аналізу виокремити вплив кожного параметру при сукупній зміні параметрів моделі а також окремо і вплив комбінацій змін параметрів.

**Практична значимість:** Модель дозволяє аналізувати вплив різних параметрів на розряд незалежно від конкретних умов експерименту. Використання ортонормованого базису для представлення параметрів дозволяє виявляти, які параметри мають найбільший вплив на стабільність і ефективність розряду як окремо, так і в комбінації з іншими параметрами. Це дає можливість оптимізувати ці параметри для досягнення найкращих результатів в конкретних умовах, що робить її універсальним інструментом для дослідників і інженерів, що полегшує аналіз взаємозв'язків між параметрами і дозволяє отримати більш повну картину поведінки системи.

**Ключові слова:** тліючий розряд; моделювання; метод Монте-Карло; гідродинамічні моделі; кінетичні моделі; гібридні моделі; ортонормований базис; швидке перетворення Фур'є.

**Вступ.** Газові розряди, зокрема тліючі газові розряди, є фундаментальним явищем, яке має широке застосування в різних галузях науки і техніки, зокрема в промислових плазмових процесах, медицині, мікроелектроніці та освітлювальних технологіях. Вивчення та моделювання цих розрядів є важливим для розуміння їх фізичних властивостей і поведінки під різними умовами. Моделювання газових розрядів дозволяє дослідникам і інженерам прогнозувати ефекти та оптимізувати параметри для конкретних прикладних завдань, таких як плазмове травлення, плазмо-хімічне травлення у виготовленні інтегральних мікросхем, очищення газів або створення нових джерел світла.

Актуальність моделювання газових розрядів обумовлена необхідністю підвищення точності та ефективності різних технологічних процесів. У зв'язку з цим розробка, адаптація до конкретних умов та впровадження нових методів моделювання, які можуть забезпечити прийнятне відтворення фізичних процесів і зменшення обчислювальних витрат, є надзвичайно важливими для наукового прогресу та технологічного розвитку.

На сьогоднішній день існує значна кількість досліджень, присвячених різним аспектам моделювання газових розрядів. Серед них варто відзначити роботи, що використовують гідродинамічні моделі, дрейфово-дифузні моделі та методи Монте-Карло. Ці методи дозволяють моделювати різні фізичні процеси в газових розрядах, такі як зіткнення частинок, іонізація та рекомбінація. Проте, незважаючи на значні досягнення в цій галузі, багато аспектів залишаються невирішеними. Зокрема, питання оптимізації моделей для підвищення точності та зменшення обчислювальних витрат, аналізу впливу конкретних параметрів на характеристики розряду, а також адаптація моделей для складних геометрій та умов залишаються актуальними.

**Постановка завдання.** Метою даної статті є всебічний аналіз сучасних методів моделювання тліючого розряду. Зокрема, стаття спрямована на порівняння характеристик, обчислювальних витрат цих моделей, а також створення узагальненої моделі, яка дозволяє прогнозувати зміну характеристик розряду при зміні одного або декількох параметрів, що є важливим для контролю процесу в реальних застосуваннях та забезпечить можливість швидко налаштувати параметри процесу для досягнення бажаних характеристик плазми.

**Основні методи моделювання.** У моделюванні тліючих розрядів на цей час існує декілька видів моделей [1]:

- Гідродинамічна модель описує плазму як континуум, використовуючи макроскопічні рівняння, такі як рівняння Нав'є-Стокса, рівняння енергії, рівняння неперервності. На сьогоднішній день гідродинамічний підхід найчастіше застосовується для моделювання плазмових тліючих розрядів. Він базується на уявленні про плазму як про континуум, що дозволяє описувати її поведінку на макроскопічному рівні за допомогою рівнянь, які визначають густину, швидкість та температуру заряджених частинок у розряді. Гідродинамічні моделі добре підходять для швидкого отримання результатів, задовільно працює в несильному полі та при низьких тисках, але їх точність недостатня для моделювання складних плазмових систем. Детально можливості та обмеження гідродинамічних моделей описані в [2].

- Кінетичні моделі описують поведінку частинок на мікроскопічному рівні. Основою є функція розподілу частинок у фазовому просторі. До таких методів належать рівняння Больцмана, метод Монте-Карло, метод частинок у комірках (Particle-in-Cell, PiC). Модель за методом Монте-Карло використовується для моделювання плазми в умовах, де необхідно детально враховувати кінетичні процеси. Вона особливо корисна для аналізу нестационарних явищ, а також для розрахунку властивостей плазми при низьких та середніх тисках, де важливі кінетичні ефекти і нелокальний транспорт електронів. Ця модель застосовується для широкого діапазону напруг, зокрема для розрядів з відносно низькою напругою, де розподіл енергії електронів значно відрізняється від теплового, а також в складних геометричних конфігураціях. З розвитком обчислювальних технологій метод Монте-Карло стає все більш популярним. Він широко використовується для моделювання процесів руху та зіткнень частинок у прикатодному шарі тліючого розряду за наявності відомих даних про електричне поле. Модель за методом Монте-Карло часто поєднують з іншими моделями, такими як частинка в комірці (PiC). Комбінація є ефективною, оскільки метод PiC обчислює електричне поле, але не враховує зіткнення частинок, тоді як метод Монте-Карло моделює рух, зіткнення і втрати енергії частинок, проте не займається розрахунком електричного поля.

- Модель на основі метода дрейфово-дифузного наближення із розв'язанням рівнянь Больцмана поєднує макроскопічний підхід до опису руху заряджених частинок з розв'язанням кінетичних рівнянь, що дозволяє враховувати складні фізичні процеси на різних масштабах. Модель підходить для низькотемпературних плазмових розрядів, таких як тліючий розряд. Вона дозволяє точно описувати просторовий розподіл плазми та її параметрів, особливо у

випадках, коли середній вільний пробіг електронів порівняний з характерними розмірами системи.

• Гібридна модель може мати, наприклад, комбінації рідинних та кінетичних моделей. Вони часто надають більш точні результати порівняно з окремо взятими гідродинамічною чи кінетичною моделлю, але потребують більше обчислювальних ресурсів. Гібридні моделі тліючого розряду дозволяють досягти високої точності та ефективності завдяки поєднанню різних підходів.

Вибір конкретної моделі залежить від завдань дослідження та доступних обчислювальних ресурсів. У табл. 1 наведено класифікацію моделей газових розрядів, їх переваги та недоліки.

**Аналіз сучасних досліджень.** На сьогоднішній день найбільш поширеним методом моделювання тліючого розряду є гібридний підхід, який поєднує кінетичні моделі та гідродинамічні моделі. Огляд та класифікацію сучасних моделей наведено в табл. 2.

Таблиця 1

**Класифікація моделей газових розрядів**

Модель	Короткий опис	Переваги	Недоліки
Гідродинамічна	Гідродинамічна модель (або макроскопічна модель) використовується для опису поведінки плазми на основі макроскопічних величин, таких як густина, швидкість і температура частинок. Базується на рівняннях збереження маси, імпульсу та енергії.	Відносно швидка і проста у реалізації для багатьох задач.	Менш точна для опису мікроскопічних процесів. Вимагає припущень щодо термодинамічної рівноваги, тому малопридатна у випадку нерівноважних процесів
Дрейфово-дифузна з розв'язанням рівнянь Больцмана	Дрейфово-дифузна модель базується на рівняннях Больцмана та використовується для опису поведінки заряджених частинок у полі. Вона враховує як дрейф частинок під дією електричного поля, так і їх дифузію внаслідок теплового руху.	Точніший опис мікроскопічних процесів. Висока точність у прогнозуванні просторового розподілу частинок	Складніша для розв'язання. Великі обчислювальні витрати особливо в багатовимірних і нестационарних випадках
Метод Монте-Карло (МС)	Симуляція траєкторій окремих частинок (електронів, іонів, нейтральних атомів) шляхом генерації випадкових чисел для визначення ймовірностей зіткнень, іонізації, рекомбінації тощо.	Висока точність в моделюванні стохастичних процесів. Гнучкість у врахуванні складних фізичних явищ.	Висока обчислювальна складність через необхідність моделювання великої кількості частинок і їх взаємодій. Для отримання статистично значущих результатів може знадобитися велика кількість симуляцій.

Продовження табл. 1

Модель	Короткий опис	Переваги	Недоліки
Частинка в комірці (PiC)	Простір розділяється на комірки, в яких обчислюються середні фізичні величини (густина зарядів, електричне поле). Кожна частинка моделюється окремо, її рух визначається рівняннями руху (Ньютона-Лоренца).	Детальне моделювання руху і взаємодії частинок, що забезпечує високу точність та дає можливість моделювання складних плазмових систем з урахуванням різних фізичних процесів.	Вимагає значних обчислювальних ресурсів та часозатрат.
Гібридні моделі	Поєднують різні чисельні підходи для досягнення кращої точності та ефективності. Такі методи використовують переваги кількох моделей і враховують їхні недоліки, щоб отримати більш надійні результати.	Дозволяють досягти високої точності та ефективності завдяки поєднанню різних підходів.	Вимагають ще більших обчислювальних та часових витрат. Складні в проектуванні.

Таблиця 2

Огляд та класифікація сучасних досліджень

Назва статті [джерело]	Метод моделювання	Основні параметри моделі
Multiple Solutions in the Theory of DC Glow Discharges [3]	Дрейфово-дифузна модель з самоузгодженням розв'язанням рівнянь Больцмана	Тиск: 30 Торр Робочий газ: Ксенон (Xe) Геометрія електродів: Циліндрична розрядна трубка з радіусом 0.5 мм і висотою 0.5 мм
2D DC Subnormal Glow Discharge in Argon [4]	Двовимірне чисельне моделювання на основі гідродинамічного методу та рівнянь Больцмана	Тиск: 1 Торр Робочий газ: Аргон (Ar) Геометрія електродів: Плоскі паралельні електроди (відстань між електродами 3.525 см, радіус електрода 5.08 см)
Second Order Fluid Glow Discharge Model Sustained by Different Source Terms [5]	Гідродинамічний метод з розв'язанням рівнянь Больцмана	Тиск: 240 Торр Робочий газ: Аргон (Ar) Геометрія електродів: Плоскі паралельні електроди з відстанню між ними 0.3 см
Glow Discharge in a High-Velocity Air Flow [6]	Кінетичне моделювання з розв'язанням рівнянь Больцмана	Тиск: Атмосферний Робочий газ: Повітря (попередньо нагріте до 1800–2900 К) Геометрія електродів: Два голкові електроди, розташовані вздовж осі газового потоку

Продовження табл. 2

Назва статті [джерело]	Метод моделювання	Основні параметри моделі
Modelling of an Atmospheric-Pressure Air Glow Discharge Operating in High-Gas Temperature Regimes [7]	Кінетичне моделювання з врахуванням реакцій асоціативної іонізації	Тиск: Атмосферний (1 атм) Робочий газ: Повітря (суміш N <sub>2</sub> –20% O <sub>2</sub> ) Геометрія електродів: Циліндр з радіусом 1 мм
On the accuracy and reliability of different fluid models of the direct current glow discharge [8]	«Розширена гідродинамічна модель» (Extended Fluid Model), яка по суті представляє собою гібридну модель з розв'язанням рівняння Больцмана для розподілу енергії електронів та рівняння Пуассона для електричного поля	Тиск: 3 Торр Робочий газ: Аргон (Ar) Геометрія електродів: Циліндрична симетрія з розрядним проміжком 1 см і радіусом 1.5 см
Study of stability of DC glow discharges [9]	Дрейфово-дифузне наближення локального поля з розв'язанням рівняння Пуассона:	Тиск: 30 Торр Робочий газ: Ксенон (Xe) Геометрія електродів: Циліндрична трубка з радіусом 1.5 мм і висотою 0.5 мм
Two-Dimensional Numerical Simulation of the DC Glow Discharge in the Normal Mode [10]	Двовимірне чисельне моделювання на основі рівнянь Больцмана, рівнянь Пуассона і відношення Ейнштейна для дифузії електронів	Тиск: 0.65 Торр, 0.947 Торр, 1.3 Торр Робочий газ: Аргон (Ar) Геометрія електродів: Плоскі паралельні електроди з відстанню між ними 3.525 см, радіус електрода 5.08 см

Узагальненням даних цих таблиць можна вважати аналітично-поведінкову модель. Тобто за потреби при моделюванні з істотними відхиленнями параметру від середнього значення обирати для визначення реакції ту чи іншу модель.

Аналіз наведених публікацій дає також змогу виокремити такі параметри впливу на тліючий розряд:

- Тиск робочого газу ( $p$ ). Тиск визначає концентрацію молекул газу, що впливає на частоту зіткнень між іонами, електронами та молекулами газу. При підвищеному тиску збільшується ймовірність зіткнень, що може призвести до втрати енергії і зменшення ефективності розряду. У низькому тиску зменшується кількість зіткнень, що може збільшити стабільність розряду.

- Відстань між електродами ( $d$ ). Відстань між електродами визначає величину напруги, необхідної для підтримання розряду. Збільшення відстані може вимагати вищої напруги для запалювання розряду, що впливає на стабільність. Оптимальне співвідношення між тиском і відстанню між електродами ( $pd$ ) забезпечує стабільний розряд при мінімальних витратах енергії.

- Електричне поле ( $U$ ). Напруга, прикладена до електродів, створює електричне поле, яке прискорює електрони. Збільшення напруги може призвести до збільшення енергії електронів, що впливає на іонізацію та може зробити розряд більш стабільним.

- Тип і склад робочого газу. Різні гази мають різну здатність до іонізації, що впливає на ефективність тліючого розряду. Наприклад, інертні гази, такі як неон або аргон, часто використовуються через їхню високу стійкість і низьку хімічну активність.
  - Конфігурація та матеріал електродів. Матеріал електродів може впливати на процеси вторинної електронної емісії, що, в свою чергу, впливає на стабільність розряду. Конфігурація електродів визначає розподіл електричного поля, що впливає на рівномірність розряду.
  - Температура ( $t$ ). Температура газу впливає на кінетичну енергію частинок і на рівень збудження молекул. Зміни температури можуть змінити частоту зіткнень і вплинути на стабільність розряду.
  - Присутність домішок або забруднень. Домішки в газі можуть змінювати рівень іонізації і впливати на стабільність розряду. Вони можуть викликати утворення додаткових шляхів для електричного струму або спричинити нестабільності.
- Те, що наведені параметри є властиві для кожної моделі, дозволяє запропонувати узагальнену модель (рис. 1).

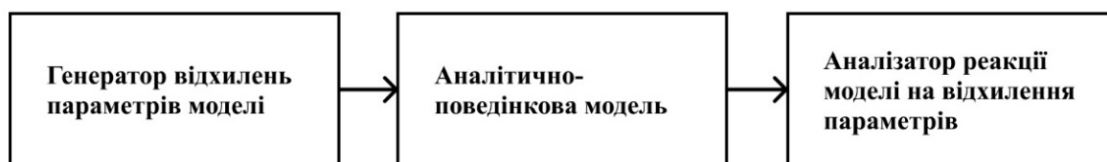


Рис. 1. Узагальнена модель дослідження газового розряду

Центральною частиною узагальненої моделі є власне аналітично-поведінкова модель, що визначена за таблицями 1, 2. На початку дослідження визначається які параметри моделі будуть незмінні, а які будуть приймати певні відхилення. Межа відхилень визначається метою моделювання. Крок відхилень визначається похибкою та особливостями того ортонормованого базису, що буде застосований в моделюванні. Для прикладу будемо вважати, що застосували широко відомий тригонометричний базис. Тоді аналітично-поведінкова модель при відхиленні параметрів буде реагувати на зміну параметрів. Ці зміни будуть уявляти собою дискретні значення синусоїд. Дискретність визначиться кроком відхилення. Вихідна реакція моделі від цих змін буде розраховуватись та фіксуватись в кожній точці і послідовність цих точок буде вхідним параметром для аналізатора реакції моделі на відхилення параметрів.

Генератор відхилень параметрів моделі – це частина узагальненої моделі, яка генерує значення компонентів вектора ортонормованого базису та визначає частку відхилення кожного параметру моделі від середнього значення. В цій частині узагальненої моделі також визначається порядок компонентів базису. До першого порядку відносять опорні компоненти, на основі яких проводиться формування відхилень. На цих опорних коливаннях після проведення аналізу послідовності точок реакції аналітично-поведінкова моделі буде спостерігатися відгук власне моделі на відхилення саме одноосібного впливу параметрів моделі на визначеному інтервалі відхилення. Ці відхилення можуть бути істотними: 1, 5, 10 чи 20% – визначає дослідник. Адже, якщо навіть вихідна реакція не буде гладкою на множині значень параметрів, то визначальним буде лише стабільність обчислень у кожній точці вектору відхилень.

Але модель може мати реакції від сумісної зміни параметрів. Це відбувається тоді, коли параметри моделі впливають на результат адитивно, мультиплікативно чи ще більше складно. Тому інші компоненти ортонормованого базису залишаються вільними і відносяться до вищих порядків. Таким чином до вищих порядків відносяться вільні компоненти ортонормованого базису, на яких передбачається реакція аналітично-поведінкової моделі на сукупну зміну на відхилення її параметрів.

Аналізатор проводить спектральний аналіз послідовності відліків реакції аналітично-поведінкової моделі на сукупну зміну на відхилення її параметрів. Кожен спектральний коефіцієнт несе інформацію про відхилення реакції від середнього значення.

Спектральні коефіцієнти а номерах опорних коливань визначають середній вплив від одноосібної зміни параметру за опорним коливанням. На інших – сумісний вплив по два та більше компонентів. Для тригонометричного базису ідентифікацію номерів впливу легко визначається за відомими формулами тригонометрії про суму до добуток гармонік.

Для випадку застосування тригонометричного базису для процедури спектрального аналізу застосовується широко відоме швидке перетворення Фур'є. Цей додаток встановлено навіть до цифрових осцилографів. Таким чином, якщо результати моделювання чи натурального експерименту спостерігати на осцилографі, то і візуалізація спектрального аналізу також може бути відтворена на екрані.

Завдяки цьому така модель дозволяє одночасно змінювати параметри моделі, накопичувати реакції у вигляді послідовності на зміни параметрів у кожному випробуванні, а по завершенні за результатами спектрального аналізу виокремити вплив кожного параметру при сукупній зміні параметрів моделі. Для цього лише потрібно визначити порядок надання відхилень параметрів, наприклад за компонентами ортонормованого базису функцій. Найпоширенішим є тригонометричний базис. Тоді в якості аналізатора реакцій моделі застосовується швидке перетворення Фур'є.

Для реалізації узагальненої моделі за допомогою тригонометричного базису кожен параметр, наприклад тиск робочого газу ( $p$ ), формується як константа ( $p_0$ ) та змінна частина  $\Delta p$  на інтервалі визначення тригонометричного базису  $\theta$ , що приймає значення на періоді від 0 до  $2\pi$ :

$$p = p_0 + \Delta p \cdot \sin 1\theta. \quad (1)$$

Для другого параметру: відстань між електродами ( $d$ ) оберемо третю гармоніку:

$$d = d_0 + \Delta d \cdot \sin 3\theta. \quad (2)$$

Друга гармоніка залишається вільною.

Аналогічно з певним кроком від гармоніки до гармоніки формується вектор варіації параметрів моделювання. Тлумачення спектральних коефіцієнтів, отриманих за допомогою швидкого перетворення Фур'є дозволяє виокремити вплив тиску за першим коефіцієнтом Фур'є, тиску – за третім. Їхній сумісний вплив – за другим, що впливає в випадку тригонометричного базису з формул тригонометрії.

В точках обрахунку похибка моделювання визначається можливостями аналітично-поведінкової моделі. Значення реакції між точками послідовності визначається кроком квантування відхилень параметрів аналітично-поведінкової моделі та особливостями конкретного ортонормованого базису.

Повне обґрунтування та деталі такого аналізу будуть надані в окремій роботі.

**Висновки.** У цьому дослідженні проведено детальний огляд існуючих моделей газового розряду, з особливим акцентом на тліючий розряд. Різноманітність підходів до моделювання була систематизована за аналітичними методами, що використовуються в їх основі. Це дозволило створити класифікацію моделей, яка допомагає краще зрозуміти і порівняти їхні основні характеристики. Узагальненням можна вважати аналітично-поведінкову модель.

Було визначено вектор параметрів, спільний для всіх розглянутих моделей. Це спрощує порівняння моделей і дає можливість узагальнювати результати для різних типів газових

розрядів. Такий підхід дозволяє більш точно описувати фізичні процеси в різних умовах і допомагає у виборі відповідного методу моделювання для конкретних задач.

Окрім цього, запропоновано узагальнену модель, де зміна параметрів описується за допомогою ортонормованого базису. Сегрегація впливу варіації кожного компоненту одноосібно та в комбінаціях з іншими відбувається за допомогою спектрального аналізу послідовності реакції у кожній точці відхилення.

Цей підхід, зокрема на прикладі тригонометричного базису, демонструє можливості моделювання процесів у газових розрядах при істотних змінах параметрів моделі. Використання ортонормованих базисів дозволяє краще контролювати вплив окремих параметрів на результати моделювання, що є важливим для подальших досліджень і практичного застосування моделей газових розрядів.

### References

### Література

1. Kuzmichev, A. I. (2018). Hazorozriadni systemy z vtorynnymu emiteramy dlia elektronnoi aparatury: dysertatsiia doktora tekhnichnykh nauk: 05.27.02 [Gas discharge systems with secondary emitters for electronic equipment: dissertation of Doctor of Technical Sciences: 05.27.02]. Kyiv: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Ihor Sikorsky". 425 p. [in Ukrainian].
1. Кузьмичев А. І. Газорозрядні системи з вторинними емітерами для електронної апаратури: дисертація доктора технічних наук: 05.27.02. Київ: Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського", 2018. 425 с.
2. Derzsi, A., Hartmann, P., Korolov, I., Karácsony, J., Bánó, G., Donkó, Z. (2009). On the accuracy and limitations of fluid models of the cathode region of dc glow discharges. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 42, No. 22. DOI: 10.1088/0022-3727/42/22/225204.
2. Derzsi A., Hartmann P., Korolov I., Karácsony J., Bánó G., Donkó Z. On the accuracy and limitations of fluid models of the cathode region of dc glow discharges. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42, No. 22. DOI: 10.1088/0022-3727/42/22/225204.
3. Almeida, P. G. C. et al. (2010). Multiple solutions in the theory of dc glow discharges. *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol. 19, No. 2. DOI: 10.1088/0963-0252/19/2/025019.
3. Almeida P. G. C. et al. Multiple solutions in the theory of dc glow discharges. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2010. Vol. 19, No. 2. DOI: 10.1088/0963-0252/19/2/025019.
4. Bouchikhi, A., Hamid, A. (2010). 2D DC Subnormal Glow Discharge in Argon. *Plasma Sci. Technol.*, Vol. 12, No. 1. DOI:10.1088/1009-0630/12/1/13.
4. Bouchikhi A., Hamid A. 2D DC Subnormal Glow Discharge in Argon. *Plasma Sci. Technol.* 2010. Vol. 12, No. 1. DOI: 10.1088/1009-0630/12/1/13.
5. Guendouz, D. et al. (2011). Second Order Fluid Glow Discharge Model Sustained by Different Source Terms. *Plasma Sci. Technol.*, Vol. 13, No. 5. DOI: 10.1088/1009-0630/13/5/14.
5. Guendouz D. et al Second Order Fluid Glow Discharge Model Sustained by Different Source Terms. *Plasma Sci. Technol.* 2011. Vol. 13, No. 5. DOI: 10.1088/1009-0630/13/5/14.
6. Cejas, E., Mancinelli, B. R., Prevosto, L. (2019). Glow Discharge in a High-Velocity Air Flow: The Role of the Associative Ionization Reactions Involving Excited Atoms. *Materials*. No. 12 (16), Atr. 2524. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12162524>.
6. Cejas E., Mancinelli B. R., Prevosto L. Glow Discharge in a High-Velocity Air Flow: The Role of the Associative Ionization Reactions Involving Excited Atoms. *Materials*. 2019. No. 12 (16), Atr. 2524. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12162524>.
7. Cejas, E., Mancinelli, B., Prevosto, L. (2020). Modelling of an Atmospheric–Pressure Air Glow Discharge Operating in High–Gas Temperature Regimes: The Role of the Associative Ionization Reactions Involving Excited Atoms. *Plasma*, No. 3 (1), P. 12–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/plasma3010003>.
7. Cejas E., Mancinelli B., Prevosto L. Modelling of an Atmospheric–Pressure Air Glow Discharge Operating in High–Gas Temperature Regimes: The Role of the Associative Ionization Reactions Involving Excited Atoms. *Plasma*. 2020. No. 3 (1). P. 12–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/plasma3010003>.



8. Rafatov, I., Bogdanov, E. A., Kudryavtsev, A. A. (2012). On the accuracy and reliability of different fluid models of the direct current glow discharge. *Phys. Plasmas*, Vol. 19, Iss. 3, Art. 033502. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3688875>.

9. Almeida, P. G. C., Benilov, M. S., Faria, M. J. (2011). Study of stability of dc glow discharges with the use of Comsol Multiphysics software. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 41. DOI: 10.1088/0022-3727/44/41/415203

10. Bouchikhi, A. (2012). Two-Dimensional Numerical Simulation of the DC Glow Discharge in the Normal Mode and with Einstein's Relation of Electron Diffusivity. *Plasma Sci. Technol.*, Vol. 14, No. 11. DOI: 10.1088/1009-0630/14/11/04.

8. Rafatov I., Bogdanov E. A., Kudryavtsev A. A. On the accuracy and reliability of different fluid models of the direct current glow discharge. *Phys. Plasmas*. 2012. Vol. 19, Iss. 3, Art. 033502. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3688875>.

9. Almeida P. G. C., Benilov M. S., Faria M. J. Study of stability of dc glow discharges with the use of Comsol Multiphysics software. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. Vol. 44, No. 41. DOI: 10.1088/0022-3727/44/41/415203.

10. Bouchikhi A. Two-Dimensional Numerical Simulation of the DC Glow Discharge in the Normal Mode and with Einstein's Relation of Electron Diffusivity. *Plasma Sci. Technol.* 2012. Vol. 14, No. 11. DOI: 10.1088/1009-0630/14/11/04.

**ANDRIENKO OLHA**

*Post graduate student,*

*Department of electronic devices and systems,*

*National Technical University of Ukraine*

*"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine*

<https://orcid.org/0000-0001-9930-4415>

*E-mail: skorp-olya@ukr.net*

**ANDRIENKO O. V.**

*National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Ihor Sikorsky Institute", Ukraine*

**A GENERALIZED MODEL OF THE GLOW DISCHARGE BASED**

**ON THE TRIGONOMETRIC BASIS**

**Purpose.** To review and classify currently existing glow discharge models by the method of mathematical description of processes, pressure, gas type and electrode geometry. The article is aimed at creating a generalized model of the discharge, which will determine the influence of each parameter on the characteristics of the discharge.

**Methodology.** To achieve the goals of the research, methods of theoretical analysis of scientific sources were used, as well as a mathematical method for describing a generalized discharge model based on an orthonormal basis, in particular a trigonometric basis.

**Findings.** An overview of the glow discharge was conducted, a classification of models based on analytical methods in their basis was proposed. The vector of parameters common to all models is isolated. Also, during the analysis, a comparison of the characteristics of the models was carried out in the form of a table. A generalized model for the study of gas discharges by the method of modeling using orthonormal bases was proposed. As an example, the formation of a vector of variable parameters in the trigonometric basis is given.

**Originality.** The article offers a generalized discharge model that demonstrates how a change in a specific parameter affects the discharge characteristics. Such a model allows you to simultaneously change the parameters of the model, accumulate reactions to changes in parameters in each test, and upon completion, based on the results of the analysis, isolate the effect of each parameter with a cumulative change in the parameters of the model.

**Practical value:** The model allows analyzing the influence of various parameters on the discharge regardless of the specific conditions of the experiment. The use of an orthonormal basis for the representation of parameters makes it possible to identify which parameters have the greatest influence on the stability and

efficiency of the discharge both individually and in combination with other parameters. This makes it possible to optimize these parameters to achieve the best results in specific conditions, making it a universal tool for researchers and engineers, which facilitates the analysis of the relationships between parameters and allows you to get a more complete picture of the system's behavior.

**Keywords:** glow discharge; modeling; Monte Carlo method; hydrodynamic models; kinetic models; hybrid models; orthonormal basis; fast Fourier transform.