

Электрический пробой

Этап №2

Дымченко Д.Ю.

11 Апреля 2025

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

- Амуничников Антон Игоревич
- Леснухин Даниил Дмитриевич
- Майзингер Эллина Сергеевна
- Дымченко Дмитрий Юрьевич
- Матюхин Павел Андреевич
- Понамарев Алексей Михайлович

1. Введение
2. Выбор подхода к моделированию
3. Алгоритм моделирования пробоя
4. Инструменты и коды
5. Дополнительные исследования
6. Выводы
7. Список литературы

Актуальность

Надёжная оценка распределения электрического поля и критических условий пробоя является ключевым аспектом при проектировании изоляционных систем, выборе материалов, а также обеспечении электробезопасности и надёжности устройств.

Также важным фактором является переход от эмпирических моделей (например, кривой Пашена) к более универсальным физически обоснованным методам, которые позволяют учитывать пространственную неоднородность, временную динамику и взаимодействие с материалами.

Объект и предмет исследования

- Процесс электрического пробоя в диэлектрической среде при наличии неоднородного электрического поля.
- Методы численного моделирования электрического поля и условий пробоя в системах с различной геометрией электродов и граничными условиями.

Цель работы

Анализ численных методов моделирования электрического пробоя в неоднородных электрических полях.

Задачи

1. Рассмотреть основные способы моделирования пробоя
2. Составить математическую модель для расчёта электрического поля.
3. Настроить численное моделирование с помощью разных алгоритмов.

Электрический пробой можно описывать разными методами в зависимости от:

- **Среды** (газ, жидкость, твёрдый диэлектрик),
- **Точности** (простая аналитическая модель или сложное численное моделирование),
- **Цели** (расчёт пробивного напряжения, визуализация процесса, исследование динамики).

Аналитические модели

Подходят, если нужно быстро оценить параметры пробоя без детального рассмотрения физики.

Закон Пашена

Применяется для **газовых разрядов** (например, искровой пробой в воздухе).

Когда можно использовать?

- Для оценки пробивного напряжения в однородном поле.
- Если не нужна детальная динамика процесса.

Формула Пашена:

$$U_{\text{пробоя}} = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln(A \cdot p \cdot d) - \ln(\ln(1 + 1/\gamma))}$$

Где:

- (p) – давление газа,
- (d) – расстояние между электродами,
- (A, B) – эмпирические коэффициенты,
- (γ) – коэффициент вторичной эмиссии.

Метод конечных элементов (FEM)

Для чего необходим?

- Расчёт распределения электрического поля $\vec{E} = -\nabla\phi$.
- Учёт сложной геометрии электродов.

Шаги:

1. Решить уравнение Пуассона:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

2. Добавить условия на границах (например, $\phi = U$ на катоде, $\phi = 0$ на аноде).
3. Найти \vec{E} и проверить, где $|\vec{E}|$ превышает критическое значение $E_{\text{крит}}$.

Инструменты: COMSOL, ANSYS, FEniCS (Python)

Particle-in-Cell (PIC)

Для чего?

- Моделирование движения заряженных частиц (электронов, ионов) в самосогласованном поле.

Алгоритм:

1. Разбить область на сетку.
2. На каждом шаге:
 - Рассчитать поле на сетке.
 - Переместить частицы в этом поле.
 - Учесть столкновения и ионизацию.

Инструменты: KARAT, COMSOL Plasma Module, VPIC.

Рассмотрим **газовый пробой** (например, в воздухе) с использованием **уравнения Таунсенда**.

Параметр	Обозначение	Пример значения
Давление газа	p	101325 Па (1 атм)
Зазор	d	0.001 м (1 мм)
Напряжение	U	3000 В
Коэф. ионизации	α	Зависит от E/p
Коэф. эмиссии	γ	0.01

Рис. 1: Входные параметры

Шаг 1. Проверка критерия пробоя

1. Рассчитать напряжённость поля:

$$E = \frac{U}{d}$$

2. Найти α (коэффициент Таунсенда):

$$\alpha = A \cdot p \cdot e^{-\frac{B \cdot p}{E}}$$

3. Проверить условие пробоя:

$$\alpha \cdot d \geq \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)$$

Рис. 2: Пошаговый алгоритм

Библиотеки

- numpy, scipy — расчёты,
- matplotlib — графика,
- PyBoltz — моделирование пробоя в газах.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Константы для воздуха
A = 15 # 1/(Pa*m)
B = 365 # V/(Pa*m)
gamma = 0.01

# Функция Пашена
def paschen_voltage(p, d):
    return B * p * d / (np.log(A * p * d) - np.log(np.log(1 + 1/gamma)))

# Давление (Па), зазор (м)
p = 101325
d_values = np.linspace(1e-6, 0.01, 100)
U_breakdown = [paschen_voltage(p, d) for d in d_values]

# График
plt.plot(d_values * 1000, U_breakdown)
plt.xlabel("Зазор, мм")
plt.ylabel("Напряжение пробоя, В")
plt.title("Кривая Пашена для воздуха при p=1 атм")
plt.grid()
plt.show()
```

Рис. 3: Пример кода для кривой Пашена

COMSOL/ANSYS (для FEM)

1. Создать геометрию электродов.
2. Задать параметры газа.
3. Добавить модуль **Electrostatics** или **Plasma**.

KARAT (для PIC-моделирования)

```
TIME 1e-9 # время моделирования  
GRID 100 100 100 # сетка  
GAS AIR # газ  
VOLTAGE CATHODE 0 ANODE 3000 # напряжение
```

Рис. 4: Пример входного файла

Если необходимо углубиться, требуется исследовать:

- Влияние влажности на пробой (увеличивает $U_{\text{пробоя}}$).
- Неоднородные поля (игла-плоскость).
- Динамика стримеров (нужны PIC-коды).

В ходе работы были рассмотрены основные алгоритмы математического моделирования электрического пробоя с использованием как численных методов, так и языков программирования и прочих инструментов.

6. Список литературы

1. Пашен Ф. “Электрические разряды в газах”, Москва, 1985.
2. Fridman A., Kennedy L. “Plasma Physics and Engineering”, CRC Press, 2011.
3. Кумпан В.О. “Диэлектрики и их применение”, СПб, 2002. “””