

Научная проблема проекта «Электрический пробой»

Разработка алгоритма моделирования электрического пробоя

Королёв И. А. , Кудряшов А. Н. , Оганнисян Д. Б. ,
Шуплецов А. А. Мугари А.

Содержание

1	Введение	6
1.1	Актуальность	6
1.2	Объект исследования	6
1.3	Цели	6
1.4	Задачи	7
1.5	Определения	7
2	Алгоритм	8
2.1	Шаг 1: Инициализация параметров среды	8
2.1.1	Физические параметры:	8
2.1.2	Расчетная область:	8
2.1.3	Пример:	9
2.2	Шаг 2: Решение уравнения Пуассона	9
2.2.1	Уравнение:	9
2.2.2	Численный метод:	10
2.2.3	Граничные условия:	10
2.3	Шаг 3: Вычисление электрического поля	10
2.3.1	Формула:	10
2.3.2	Шаги:	11
2.4	Шаг 4: Моделирование движения носителей заряда	12
2.4.1	Уравнение движения:	12
2.4.2	Численный метод:	12
2.4.3	Результат:	12
2.5	Шаг 5: Решение уравнения непрерывности	12
2.5.1	Уравнение:	13
2.5.2	Численная реализация:	13
2.6	Шаг 6: Обработка условий пробоя	13
2.6.1	Критерий:	13
2.6.2	Действия:	13
2.6.3	Варианты:	14
2.7	Шаг 7: Анализ устойчивости и точности	14
2.7.1	Погрешности:	14
2.7.2	Устойчивость:	14
2.7.3	Тестирование:	14
2.8	Блок-схема алгоритма	15
3	Вывод	16

Список иллюстраций

2.1	Схема расчётной области	9
2.2	Векторное поле электрического потенциала	11
2.3	Блок-схема алгоритма моделирования электрического пробоя . .	15

Список таблиц

1 Введение

На данном этапе группового проекта рассматривается разработка алгоритмов для численного моделирования электрического пробоя в диэлектриках. Электрический пробой — это критическое явление, которое важно понимать и прогнозировать для проектирования надежных изоляционных материалов и систем.

1.1 Актуальность

Электрический пробой играет ключевую роль в электротехнике, материаловедении и физике твердого тела. Его моделирование позволяет: - Анализировать условия возникновения пробоя. - Оптимизировать свойства диэлектрических материалов. - Прогнозировать поведение электрических систем в экстремальных условиях.

1.2 Объект исследования

- Электрический пробой в диэлектриках.

1.3 Цели

Разработать алгоритм для численного моделирования электрического пробоя, пригодный для программной реализации.

1.4 Задачи

- Преобразовать физические уравнения в численные формы.
- Выбрать оптимальные численные методы.
- Описать пошаговый алгоритм моделирования.
- Учесть условия возникновения пробоя.
- Подготовить основу для программной реализации.

1.5 Определения

Электрический пробой — физическое явление, при котором диэлектрик теряет изолирующие свойства под воздействием сильного электрического поля, что приводит к резкому увеличению проводимости.

Алгоритм — последовательность шагов, систематизирующая решение задачи для достижения воспроизводимых результатов.

2 Алгоритм

Алгоритм моделирования электрического пробоя состоит из нескольких этапов, каждый из которых решает конкретную задачу в процессе перехода от физической модели к вычислительной реализации.

2.1 Шаг 1: Инициализация параметров среды

На первом этапе задаются начальные условия и параметры системы, которые определяют достоверность моделирования.

2.1.1 Физические параметры:

- **Диэлектрическая проницаемость ϵ :** Характеризует способность материала поляризоваться в электрическом поле.
- **Начальная плотность заряда ρ_0 :** Определяет исходное распределение зарядов в диэлектрике.
- **Граничные условия:** Например, условия Дирихле ($\varphi = V_0$ на электродах) или Неймана ($\partial\varphi/\partial n = 0$ на изолированных границах).
- **Начальное распределение потенциала φ_0 и поля E_0 .**

2.1.2 Расчетная область:

- Геометрия (например, 2D: $L_x \times L_y$).
- Пространственная сетка с шагами dx, dy (например, $dx = dy = 0.01$ мм).

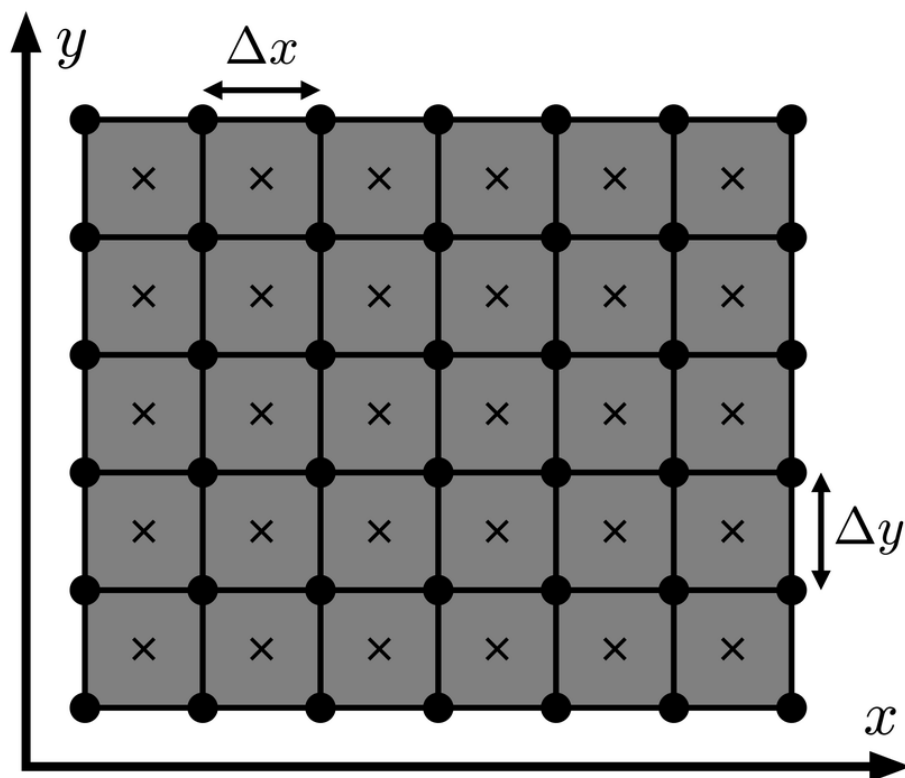


Рис. 2.1: Схема расчётной области

2.1.3 Пример:

- Потенциал на катоде: $\varphi = 0$ В.
- Потенциал на аноде: $\varphi = V_0$ В.

2.2 Шаг 2: Решение уравнения Пуассона

Этот этап вычисляет распределение электрического потенциала в системе.

2.2.1 Уравнение:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon}$$

Где:

- φ — электрический потенциал,
- ρ — плотность заряда,
- ε — диэлектрическая проницаемость.

2.2.2 Численный метод:

- **Метод конечных разностей:**

$$\frac{\varphi_{i+1,j} + \varphi_{i-1,j} + \varphi_{i,j+1} + \varphi_{i,j-1} - 4\varphi_{i,j}}{h^2} = -\frac{\rho_{i,j}}{\varepsilon_{i,j}}$$

- Итерационные методы: Якоби, Гаусс-Зейдель или метод сопряженных градиентов [1]

2.2.3 Граничные условия:

- $\varphi = V_0$ на электродах.
 - $\partial\varphi/\partial n = 0$ на изолированных границах.
-

2.3 Шаг 3: Вычисление электрического поля

Электрическое поле рассчитывается на основе потенциала [2]

2.3.1 Формула:

$$E = -\nabla\varphi$$

Дискретизация (для 2D):

- $E_x = -\frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i-1,j}}{2\Delta x},$
- $E_y = -\frac{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j-1}}{2\Delta y}.$

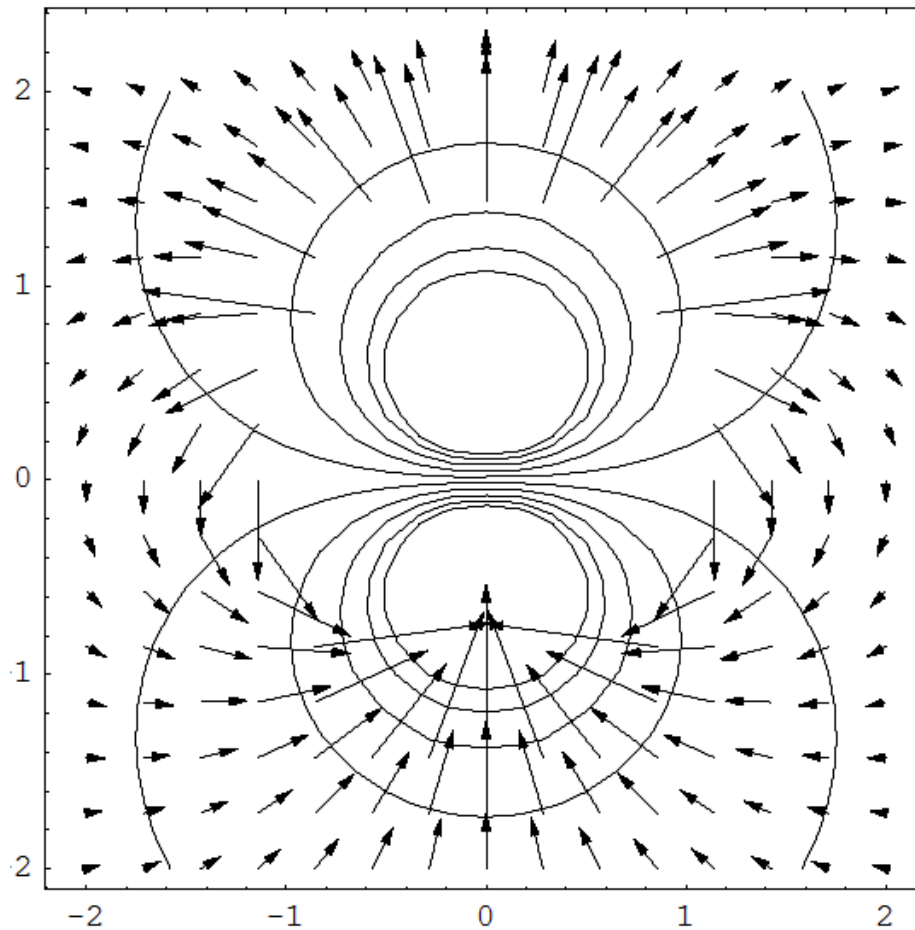


Рис. 2.2: Векторное поле электрического потенциала

2.3.2 Шаги:

1. Решить уравнение Пуассона для получения $\varphi(t)$.
2. Вычислить компоненты поля E_x, E_y .
3. Обновить массив значений поля.

2.4 Шаг 4: Моделирование движения носителей заряда

На этом этапе учитывается динамика зарядов в электрическом поле.

2.4.1 Уравнение движения:

$$m \frac{dv}{dt} = qE - \nu v$$

Где:

- m — масса носителя,
- q — заряд,
- ν — коэффициент сопротивления среды.

2.4.2 Численный метод:

- **Метод Эйлера:** Для обновления скорости и положения частиц [2].
- **Метод Монте-Карло:** Учет случайных процессов (например, ионизация):
 1. Расчет свободного пробега.
 2. Генерация случайных событий.
 3. Корректировка траекторий.

2.4.3 Результат:

- Траектории носителей заряда.
 - Зоны ионизации.
-

2.5 Шаг 5: Решение уравнения непрерывности

Этот этап описывает сохранение заряда в системе.

2.5.1 Уравнение:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot j = 0$$

Где $j = \sigma E$ — плотность тока, σ — проводимость.

2.5.2 Численная реализация:

- Дискретизация:

$$\frac{\rho_{i,j}^{n+1} - \rho_{i,j}^n}{\Delta t} + \nabla \cdot j = 0$$

- Итерационное обновление ρ .
-

2.6 Шаг 6: Обработка условий пробоя

Финальный этап определяет момент пробоя.

2.6.1 Критерий:

- $E > E_{crit}$ (например, $E_{crit} = 3$ МВ/м для воздуха).

2.6.2 Действия:

1. Проверка значения E в каждой точке сетки [3]
2. Фиксация:
 - Координаты точки пробоя.
 - Время пробоя.
 - Параметры среды.

2.6.3 Варианты:

- Остановка расчета при достижении пробоя.
 - Продолжение моделирования для анализа стримерного режима.
-

2.7 Шаг 7: Анализ устойчивости и точности

2.7.1 Погрешности:

- Ошибки дискретизации (зависят от Δx , Δt).
- Накопление ошибок в итерациях.

2.7.2 Устойчивость:

- Условие сходимости численных методов.
- Оптимизация шага по времени (условие Куранта).

2.7.3 Тестирование:

- Сравнение с аналитическими решениями.
 - Валидация на тестовых задачах.
-

2.8 Блок-схема алгоритма

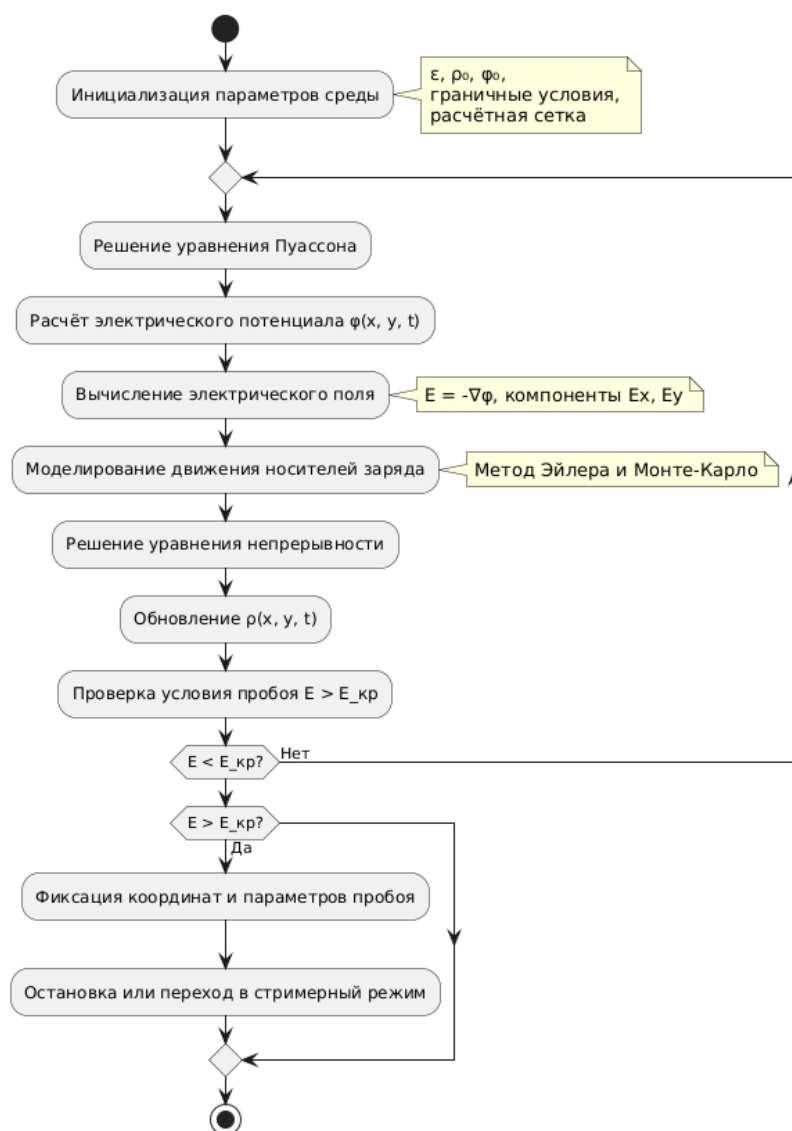


Рис. 2.3: Блок-схема алгоритма моделирования электрического пробоя

3 Вывод

Разработан полный алгоритм моделирования электрического пробоя, включающий инициализацию параметров, численное решение ключевых уравнений и обработку условий пробоя. Алгоритм готов к программной реализации и дальнейшему тестированию для анализа поведения диэлектриков в экстремальных условиях.

4 Список литературы

1. Sander L.M. Diffusion-limited aggregation: A kinetic critical phenomenon? // Contemporary Physics. 2000. Т. 41, № 4. С. 203–218.
2. Тыртышников А.Ю. и др. Сравнение алгоритмов DLA и RLA при моделировании пористых структур. НИИ «Центрпрограммсистем», 2017. 244 с.
3. Медведев Д.А. и др. Моделирование физических процессов и явлений на ПК: Учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010. 101 с.