

# Проект: Электрический пробой

## Этап 4. Результаты проекта

---

Кадров В. М. Туем Г. Адабор К. Т.

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

## Этап 1: Модель

---

Электрический пробой – это явление резкого возрастания электрического тока через диэлектрик, сопровождающееся потерей его изолирующих свойств. Другими словами, это переход материала из изолирующего состояния в проводящее под воздействием сильного электрического поля.



## Этап 2: Алгоритмы

---

Необходимо разработать алгоритм для решения задачи моделирования электрического пробоя (модель Нимейера, Пьетронеро и Висмана). Всего мы имеем 2 этапа моделирования:

- Расчет электрического поля
- Итерационное моделирование роста стримера (главной ветви заряда)

Поскольку задача расчета поля сводится к решению уравнения Лапласа

$$\nabla^2 \varphi = 0$$

, то мы можем использовать аппроксимацию электрического потенциала на сетке

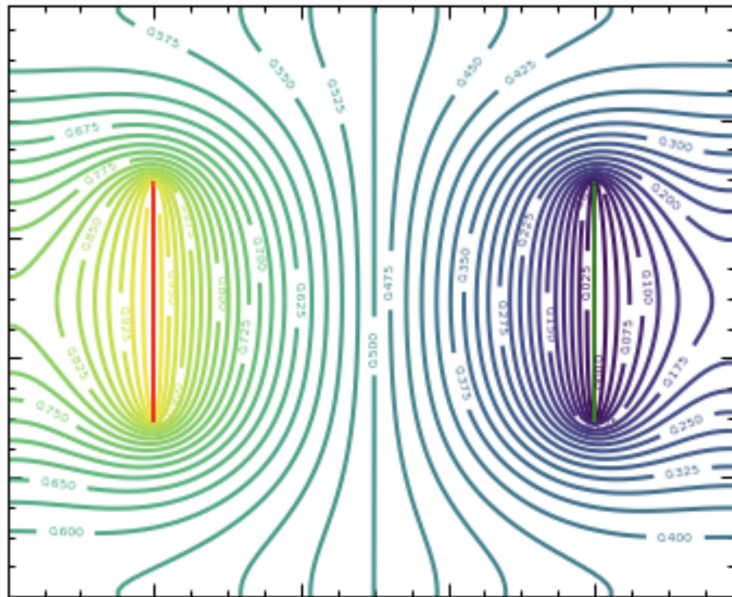
$$\varphi_{i,j} = \frac{1}{4}(\varphi_{i-1,j} + \varphi_{i+1,j} + \varphi_{i,j-1} + \varphi_{i,j+1})$$

Таким образом, для решения этого уравнения методом конечных разностей нам необходимо:

1. Разбить сетку с шагом  $\Delta$
2. Задать граничные условия
3. Рассчитывать  $\varphi_{i,j}$  в каждом узле.
4. Повторять пункт 3 до достижения сходимости



Часто рассматривается система, состоящая из двух горизонтальных плоских электродов, пространство между которыми заполнено диэлектриком. Удобно задать потенциал одного из электродов равным нулю. Тогда потенциал второго электрода равен приложенному напряжению. Для простоты можно рассматривать задачу в прямоугольной области, ограниченной сверху и снизу электродами, а слева и справа — вертикальными границами, на которых тоже необходимо задать граничные условия.



Рост начинается с одной из точек на электроде. На каждом шаге роста с некоторой вероятностью может образоваться одна веточка разрядной структуры. Эта веточка будет соединять два соседних узла сетки, один из которых уже принадлежит разрядной структуре, а другой является «диэлектриком».

Удобно рассматривать рост структуры с электрода, имеющего нулевой потенциал.

Обычно предполагают, что вероятность образования новой ветки приблизительно равна  $p(E) \propto E^\eta$ , где  $\eta$  — так называемый показатель роста, зависящий только от свойств диэлектрика.

На каждом шаге роста случайный процесс выбора новой веточки структуры реализуется следующим алгоритмом:

1. Для каждого возможного направления роста считается сумма  $Z = \sum_{k=1}^M E_k \eta$
2. Случайным образом выбирается число  $\epsilon$  от 0 до  $Z$
3. Затем повторно шаг за шагом рассчитывается сумма  $Z$  до тех пор, пока текущая сумма не станет больше  $\epsilon$ . Тот узел, для которого сумма стала больше  $\epsilon$ , присоединяется к структуре.
4. Новой образовавшейся веточке присваивается значение потенциала того электрода, с которого начался рост этого стримера.
5. Алгоритм повторяется до тех пор, пока стримир не дойдет до второго электрода. Таким образом, мы получаем однозвенную структуру стримера.

## Этап 3: Комплексы программ

---

Необходимо написать программную реализацию решения задачи моделирования электрического пробоя на языке Julia

Задаем начальные условия для расчета электрического поля: сетка 50x50, два электрода:

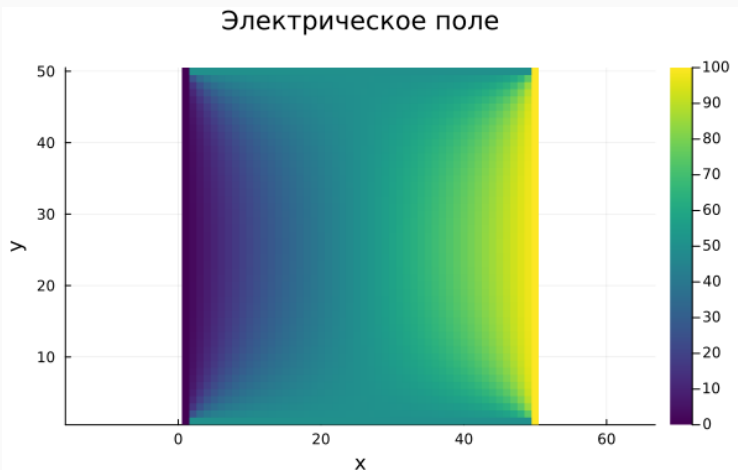
- К правому приложено напряжение
- На левом потенциал равен нулю, как на других границах
- Начальные значения в узлах сетки также равны нулю



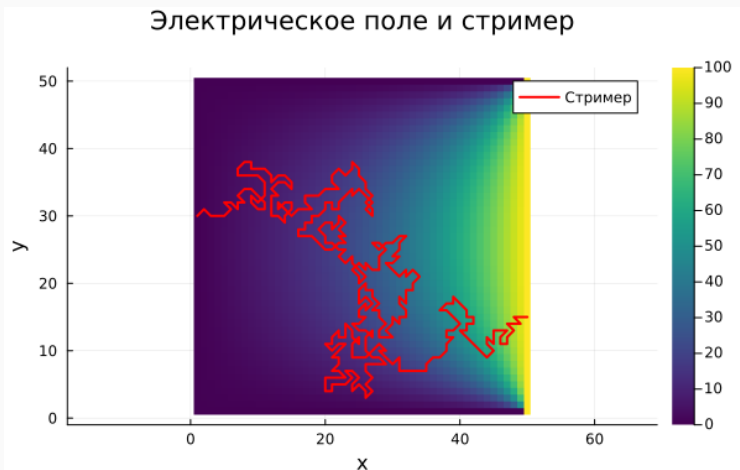
```
rows, cols = 50, 50  
field = fill(0.0, rows, cols)  
field[:, 1] .= 0.0      # левый электрод  
field[:, end] .= 100.0 # правый электрод
```

## Расчет электрического поля

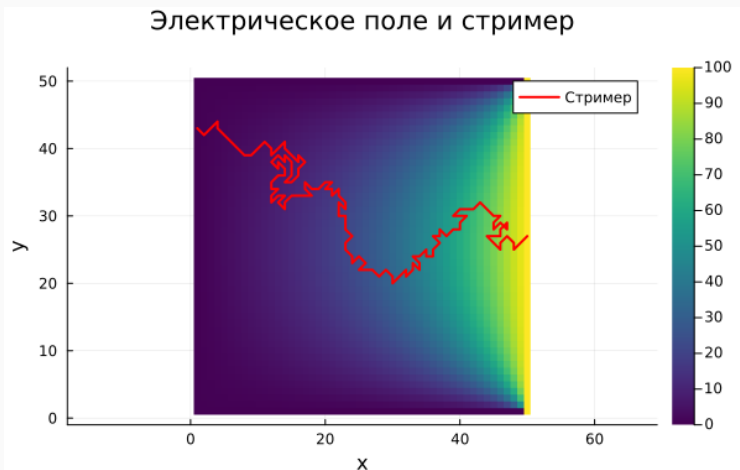
Итерации в цикле останавливаются, если мы достигли сходимости, либо же если количество итераций превысило максимум (`max_iter`).



Попробуем запустить моделирования с разным фактором роста. При малом параметре роста структура получается достаточно запутанной.



Хорошо видно, что чем выше показатель роста, тем более прямолинейная получается структура стримера



1. Было дано точное и полное определение электрического пробоя, стримера. Описана модель роста стримеров НПВ.
2. Подготовлен алгоритм для решения задачи моделирования пробоя в диэлектрике.
3. Написана программная реализация решения задачи моделирования электрического пробоя на языке Julia.