

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ПОЛЕЙ В ПРОЦЕССАХ ГАЗООЧИСТКИ И ЭЛЕКТРОЛИЗА

Митин К.В.

Научный руководитель — профессор Горенский Б.М.

*Сибирский федеральный университет*

Моделирование электрических и электромагнитных полей позволяет изучать электрические и магнитные потоки, что актуально как для разработки новых датчиков, так и для проектирования бездатчиковых систем регулирования электропривода. Кроме того, моделирование электрических полей, возникающих в процессе электролиза между поверхностью анода и зеркалом расплавленного металла, помогает исследовать природу взаимодействия анода с расплавленным металлом. Это позволяет оптимизировать управление процессом.

В данной работе моделируется движение заряженных частиц в электрическом поле двух электродов, катода и анода, что характерно для процессов газоочистки в электрофильтрах и электролиза. Частицы распределены равномерно на катоде. Вылетая с катода, заряженные частицы летят по параболической траектории. Для расчёта данной траектории в пространстве используются компоненты скорости и ускорения по координатам  $x$  и  $y$  (рис. 1), так как траектории движения заряженных частиц находятся в плоскостях, параллельных координатной плоскости  $xu$ . При отсутствии столкновений заряженные частицы перемещаются равноускоренно под действием электрического потенциала. Однако реальная траектория движения является случайной, поскольку скорость и ускорение заряженной частицы в каждой точке ее траектории зависят от случайных столкновений с другой заряженной частицей или стенкой ёмкости, являющейся диэлектриком. Поэтому в каждой точке рассчитывается свой вектор ускорения, который затем используется для определения скорости в этой точке.

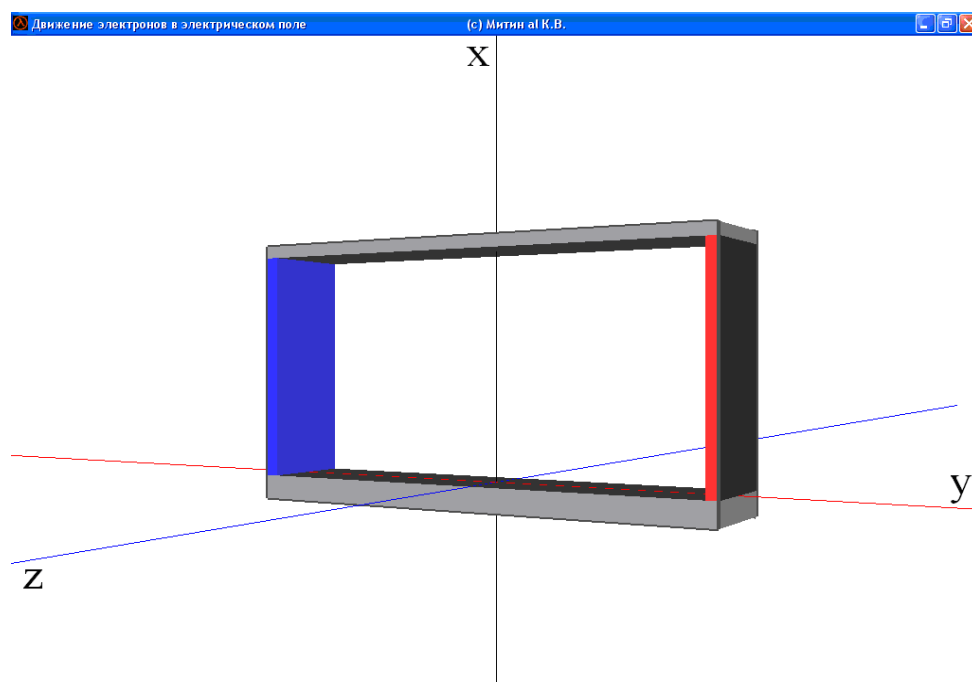


Рис. 1 Расположение осей координат.

В основу математической модели движения заряженной частицы положены законы движения электрона под действием электрической силы. Для каждого участка траектории строятся отдельные уравнения движения, с помощью которых находятся координаты и скорость частицы в любой момент времени  $t$ .

Движение заряженной частицы от катода к аноду при параллельном расположении электродов прямолинейно.

После прохождения частицы через электрическое поле при начальной скорости  $v = 0$  под действием потенциала  $U$  его кинетическая энергия равна  $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = e \cdot U$ .

Тогда скорость электрона

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}},$$

т. е. скорость электрона пропорциональна корню квадратному из ускоряющего напряжения.

Если частица входит параллельно эквипотенциальным поверхностям (электродов) или под углом к ним, то он движется по параболической траектории [3, 4]. Происходит геометрическое сложение начальной скорости электрона и скорости, приобретаемой им в электрическом поле. Начальный радиус кривизны  $r$  параболической траектории электрона в поперечном поле вычисляется из выражения центростремительной силы:  $e \cdot E = \frac{m \cdot v^2}{r}$ , откуда  $r = \frac{m \cdot v^2}{e \cdot E}$ .

В декартовой системе координат положение частицы удобно задавать радиус-вектором  $\vec{r}(t)$ , проведенным из начала отсчета  $(0,0,0)$ :

$$\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}$$

Тогда скорость в момент времени определяется как производная радиус-вектора  $\vec{r}$  по времени, то есть

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{i} \frac{dx}{dt} + \vec{j} \frac{dy}{dt} + \vec{k} \frac{dz}{dt} = \vec{i} v_x + \vec{j} v_y + \vec{k} v_z, \quad (1)$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – единичные орты в направлении координатных осей. Если известны координаты и скорость системы, движущейся под действием силы в начальный момент времени  $t=t_0$ , то в любой другой момент времени состояние системы можно предсказать, решив уравнения движения, которые в нерелятивистском случае имеют вид

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса частицы.

Будем считать, что частица, вылетевшая в момент времени  $t_0$  из точки  $(x_0, -d, 0)$  катода (рис. 2), имеет начальную скорость  $\vec{v}_0 = (v_0, 0, 0)$ . Попадая в пространство между катодом и анодом, она начинает двигаться ускоренно в направлении  $OY$  к аноду под действием электрической силы  $\vec{F}_1 = e \cdot \vec{E}_1$ , где  $e$  - заряд электрона, а  $\vec{E}_1 = (0, E_1, 0)$  - напряженность электрического поля между электродами.

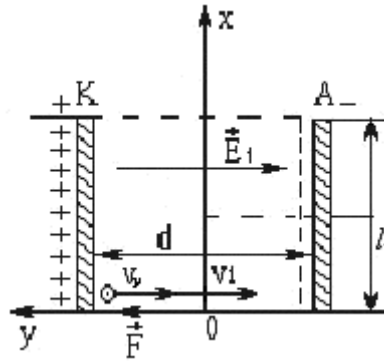


Рис. 2 Движение частицы:  $l_1$  - длина пластин электродов;  $d$  - расстояние между пластинами; К и А - катод и анод соответственно.

Согласно уравнениям движения (2) к моменту времени  $t$  частица приобретает скорость

$$\vec{v}(t) = \left( v_0, \frac{e \cdot E_1}{m} \cdot t, 0 \right) = \vec{v}_1.$$

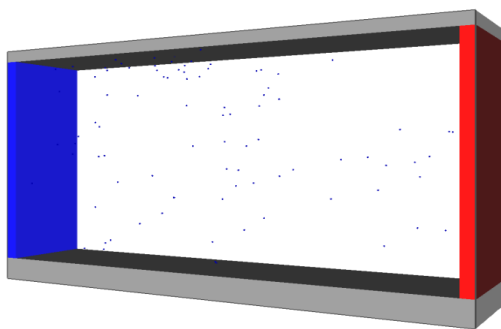
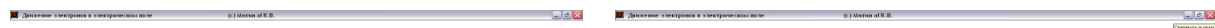
Тогда кинематические уравнения движения частицы в электрическом поле имеют вид:

$$v_x = v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}}, \quad v_y = \frac{q \cdot E_1}{m} \cdot t, \quad v_z = 0, \quad (3)$$

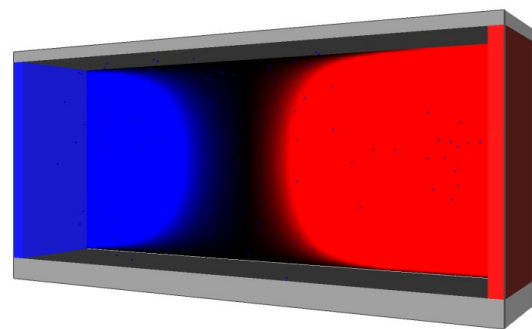
$$x(t) = v_0 \cdot t + x_0, \quad y(t) = \frac{q \cdot E_1}{m} \cdot \frac{t^2}{2} - d, \quad z = 0 \quad (4)$$

Моделирование потока заряженных частиц и потенциалов катода и анода осуществляется с помощью 3D эмулятора электрического поля.

Эмулятор позволяет поворачивать объект под разным углом зрения. На рисунке 3 показаны результаты моделирования при параллельном расположении электродов, характерном для процесса электролиза.



а)



б)

Рис. 3 Параллельное расположение электродов: а) поток заряженных частиц; б) потенциалы катода (слева) и анода (справа).

Благодаря тому, что траектории движения заряженных частиц параболические, можно располагать электроды друг относительно друга как угодно. Например, их можно расположить перпендикулярно друг другу (рис. 4). Это соответствует положению обмоток в электроприводе.

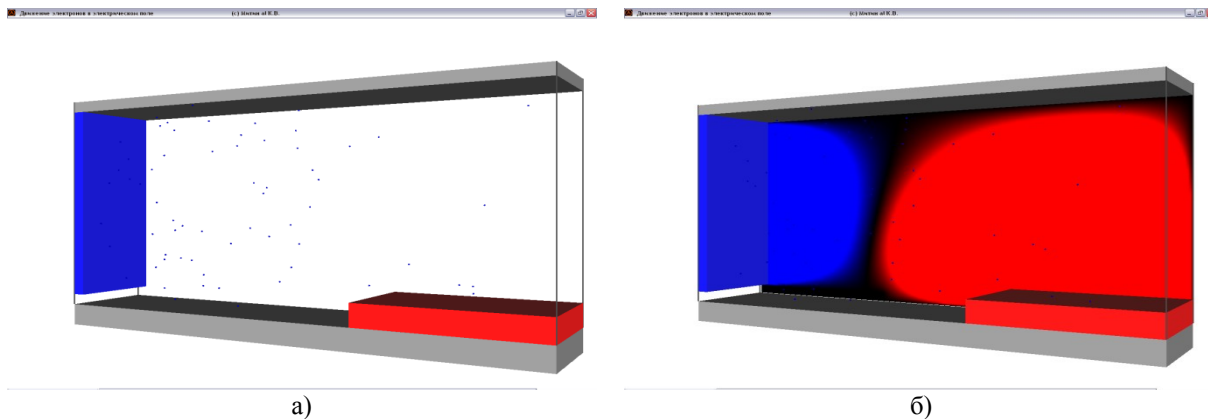


Рис. 4 Перпендикулярное расположение электродов: а) поток заряженных частиц; б) потенциалы катода (слева) и анода (справа).

Эмулятор позволяет моделировать потенциалы, возникающие между заряженными плоскостями с любой плотностью заряда, как при равномерном, так и при неравномерном распределении заряда. Значение потенциалов между заряженными пластинами рассчитывается в каждой точке поля и записывается в двумерный массив  $f$ .

Далее значения элементов массива пересчитываются по формуле

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

где  $i$  – координата по оси  $X$ ,  $j$  – координата по оси  $Y$  пространства между заряженными пластинами. Из формулы видно, что значение потенциала в каждой точке поля определяется при помощи значений потенциалов в соседних точках, нахождением среднего между ними.

После этого значения массива  $f$  содержат значение потенциалов в каждой точке поля и используются как для построения полета заряженных частиц, так и для отрисовки потенциалов, определяя цвет и его глубину. Потенциалы электродов моделируются в плоскости координат  $x$  и  $y$ , потому что эти потенциалы не зависят от ширины электродов  $z$ .

На основе разработанной математической модели был создан 3D эмулятор, включающий в себя пять программ для моделирования движения заряженных частиц при различном положении электродов и имитации движения нерелятивистских частиц между электродами электрофильтра газоочистки. Он позволяет моделировать потенциалы, возникающие между заряженными плоскостями с любой плотностью заряда и при любом положении пластин друг относительно друга, как при равномерном, так и при неравномерном распределении заряда. В эмуляторе смоделирован сброс осажденной пыли по требованию оператора и в автоматическом режиме. 3D эмулятор создан в среде интегрированной разработки приложений Embarcadero CodeGear Rad Studio 2009, с использованием языка программирования Delphi и графической библиотеки OpenGL. При незначительной модернизации эмулятор можно использовать для моделирования электромагнитных полей.

Численный эксперимент моделирования проводился применительно к процессу газоочистки в электрофильтре ЭГАВ 1-40-9-6-4, который используется на красноярском цементном заводе для очистки отходящих газов.