

ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В РАЗРЯДНОМ БЛОКЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

А.И. Штифанов

Электрогидравлический эффект находит широкое применение в промышленности [1]. Одно из направлений связано со штамповкой деталей сложной формы с помощью электрогидроимпульсных установок. Данные установки с целью расширения технологических возможностей оснащены многокамерным разрядным блоком (МРБ), состоящем из набора электродных пар направленного воздействия (ЭПНВ) [2] (рис. 1).

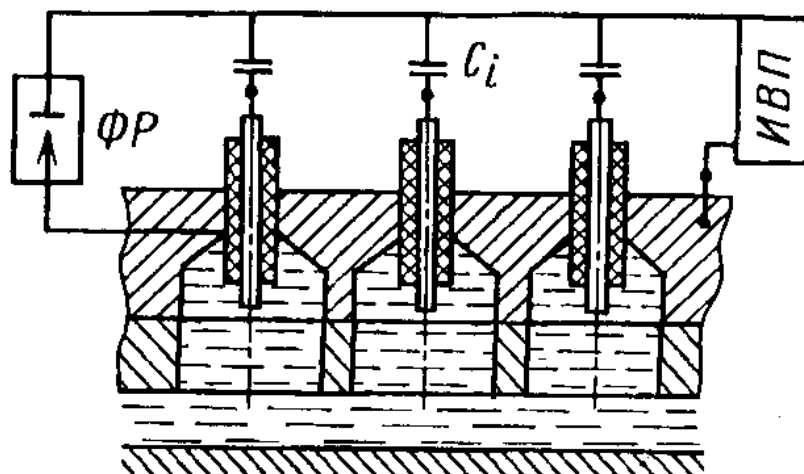


Рис. 1. Принципиальная схема многокамерного разрядного блока [2]:
ФР - формирующий разрядник; C_i - батарея конденсаторов одного из контуров; ИВП - источник высоковольтного питания

Для исследования неоднородных и нестационарных процессов, возникающих при электрогидравлическом эффекте, разработан комплекс программ, состоящий из двух частей: программы моделирования технологических объектов в виде плоских и объемных моделей. При этом каждая часть состоит из следующих модулей:

1. Модуль инициализации модели.
2. Модуль расчета электрического поля.
3. Модуль расчета волновых процессов.
4. Модуль расчета расширения газовой полости, образовавшейся при пробое в жидкости.
5. Модуль вывода полей распределения потенциала, скорости, давления, энергии и записи полученных результатов в файл.

Данные модули выполняют одни и те же функции как в плоской, так и в объемной модели, но имеют отличия в программной реализации. На примере объемной модели, представленной на рис.2, рассмотрим алгоритм моделирования электрического поля, возникающего в камере с одной ЭПНВ и его программную реализацию.

Моделируемая камера состоит из следующих объемных фигур (рис.2): полусфера, цилиндр, параллелепипед, внутри которых находится жидкость. Один электрод \mathcal{E}_1 изо-

лирован и расположен по центру полусферы, другой Ξ_2 неизолирован и находится в правой части цилиндра на границе сфера-цилиндр.

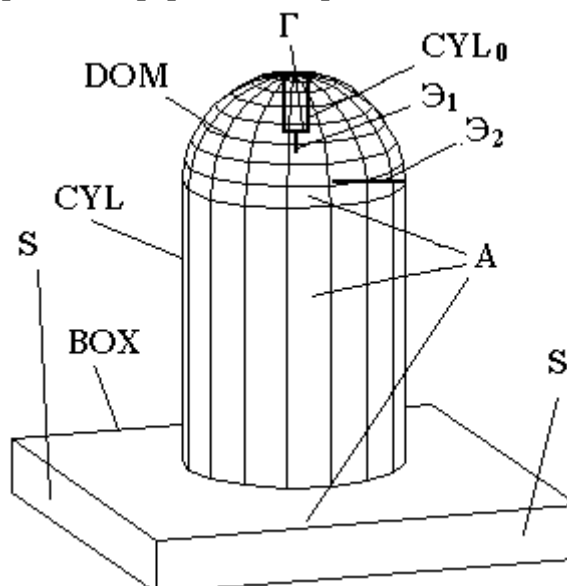


Рис. 2. Схема разрядного блока МРБ:

Ξ_1 , Ξ_2 — электроды, BOX — параллелепипед; CYL — цилиндр; DOM — полусфера (купол); S — плоскость симметрии МРБ; A — область жидкости; CYL₀ — боковая поверхность изоляционного материала; Г — плоская поверхность изоляционного материала

Для нахождения электрического поля потенциала внутри камеры с двумя электродами, погруженными в жидкость, необходимо найти решение уравнения Лапласа в заданной области A изменения пространственных переменных x, y и z:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где ξ — электрический потенциал.

При этом на границах Ξ_1 и Ξ_2 используется уравнение Пуассона:

$$\Delta \xi = f_0, \quad (2)$$

Δ — оператор Лапласа; f_0 — некоторая потенциальная функция, равная const.

Чтобы выделить единственное решение среди семейства решений уравнения (1) вводятся исходные данные и граничные условия, заданные на границах BOX, CYL, DOM, Ξ_1 , Ξ_2 , Г, CYL₀, S области A.

Одним из численных методов решения уравнения (1) является метод сеток [3]. Он основан на следующих принципах:

- дискретизация пространственной области;
- выбор узловых точек внутри области;
- составление системы алгебраических уравнений относительно значений искомых функций в узловых точках;
- нахождение значения исследуемых величин в узловых точках с использованием одного из методов решения конечно-разностных уравнений [4].

Рассматриваемая программа спроектирована и реализована на основе объектно-ориентированной методологии построения программ [5] и языка программирования

Си++ [6]. В качестве базовой операционной системы для программы моделирования выбран ОС Windows [7].

В программе реализованы следующие структуры данных:

- Класс “УЗЕЛ”. Описывает характеристики одного узла сетки.
- Класс “МОДЕЛЬ”. Описывает свойства и поведение модели.
- Класс “ГРАНИЦА”. Описывает общие для каждой границы характеристики.
- Классы “ПОЛУСФЕРА”, “ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕД”, “КОНУС”, “ЦИЛИНДР” являются наследниками класса “ГРАНИЦА” и конкретизируют свойства и поведение трехмерных геометрических примитивов.

В качестве свойств объекта класса “УЗЕЛ” выступают:

- значение электрического потенциала — ξ ;
- расчетный признак $w_{i,j,k}$, определяющий какое из следующих граничных условий выполняется для узла с координатами (i,j,k) :
 - на поверхности S : условие симметрии [6],
 - на неизолированном электроде Ξ_2 : $\xi = 0$, (3)
 - $\text{if } \xi \in \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\} \text{ then } \xi = \xi_i$: $\xi = \text{const}$, (4)
 - $\text{if } \xi \in \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\} \text{ then } \xi = \xi_i$ CYL₀ $\in \tilde{A}$: $\partial \xi / \partial n = 0$, (5)
 - если узел не имеет граничного условия, то признак неопределен.
- признак геометрического расположения узла относительно центра модели. Может содержать следующие значения: “СЛЕВА”, “СПРАВА” и т.п. Используется при расчете узлов, лежащих на жестких границах, а также для отметки узлов, расположенных внутри расчетной области значением “УЗЕЛ ВНУТРИ”, и узлов, лежащих вне модели значением “УЗЕЛ ВНЕ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ”.

Все границы модели определяются пользователем в файле исходных данных, заносятся программой в список и аппроксимируются на регулярной равномерной сетке с шагом h . Аппроксимация выполняется на основе алгоритмов Брезенхема [10].

Объект класса “МОДЕЛЬ” представляет собой совокупность матрицы узлов размерностью $N \times M \times L$ и список границ. В качестве свойств данного объекта выступают: процедура загрузки исходных данных и инициализации модели, процедуры расчета, процедура вывода результатов и записи их в файл. Габаритные размеры модели ограничены только объемом имеющейся в компьютере оперативной памяти.

Модуль инициализации модели присваивает каждому узлу исходное значение и устанавливает признаки расчета и геометрического положения узла относительно центра модели.

Модуль расчета электрического поля состоит из набора процедур, реализующих следующий алгоритм:

1. Вводятся циклы по узлам пространственной сетки:
 $i = 0, 1, 2 \dots N$; $j = 0, 1, 2 \dots M$; $k = 0, 1, 2 \dots L$.
 - 1.1. Рассматривается расчетный признак узла $w_{i,j,k}$.
 - 1.2. Если узел лежит вне расчетной области, переходим к п.1.9.

- 1.3. Если узел лежит внутри расчетной области, то используя неявную разностную схему, для уравнения (1):

$$\frac{u_{i-1,j,k} + u_{i+1,j,k} + u_{i,j-1,k} + u_{i,j+1,k} + u_{i,j,k+1} + u_{i,j,k-1} - 6u_{i,j,k}}{h^2} = 0,$$

и ускоряющий множитель Либмана $\alpha=1..2$ вычисляем новое значение потенциала $u_{i,j,k}^{(q)}$:

$$u_{i,j,k}^{(q)} = u_{i,j,k}^{(q-1)} + \alpha(u_{i,j,k}^{(q)} - u_{i,j,k}^{(q-1)}),$$

где u — сеточная функция потенциала ξ , q — текущая итерация,

$q-1$ — предыдущая итерация.

- 1.4. Если узел лежит на одной из боковых поверхностей S , например, справа, то $u_{i,j,k}^{(q)}$ находим согласно условию симметрии из следующего выражения:

$$\frac{2u_{i-1,j,k} + u_{i,j-1,k} + u_{i,j+1,k} + u_{i,j,k+1} + u_{i,j,k-1} - 6u_{i,j,k}}{h^2} = 0.$$

- 1.5. Если узел лежит на неизолированном электроде Ξ_2 , то $u_{i,j,k}^{(q)} = 0$.

- 1.6. Если узел лежит на изолированном электроде Ξ_1 , то $u_{i,j,k}^{(q)} = \text{const}$.

- 1.7. Если узел лежит на поверхности изоляционного материала электрода Ξ_1 , то $\partial u / \partial n = 0$.

- 1.8. Вычисляем погрешность $\Delta u = |u_{i,j,k}^{(q)} - u_{i,j,k}^{(q-1)}|$. Находим максимальную погрешность: если $\Delta u_{\max} < \Delta u$, то $\Delta u_{\max} = \Delta u$.

- 1.9. Переход к следующему узлу на координатной сетке. Переход к п.1.1.

2. Проверка условия достижения требуемой точности расчета:

$$\Delta u_{\max} < \varepsilon,$$

где ε - требуемая точность расчета.

Если условие выполняется, переход к п.3, иначе к п.1.

3. Окончание расчета и вывод эквипотенциальных полей (рис. 3) по следующему алгоритму: определяются минимальные и максимальные значения потенциала в расчетной области, по заданному числу линий C определяется шаг (диапазон приращения функции) одной эквипотенциали $\Delta u = (u_{\max} - u_{\min}) / C$. Затем определяется порядковый номер эквипотенциали, которой принадлежит i -й узел $C_i = (u_i / \Delta u)$.

Если C_i - четное число, то узел отрисовывается белым цветом, иначе черным.

После окончания расчета можно просмотреть линии равных напряженностей поля и потенциала в любой плоскости пространства, распределение энергии, а также расположение в пространстве канала пробоя в жидкости. Сформировать мини-отчет в документе MS Word.

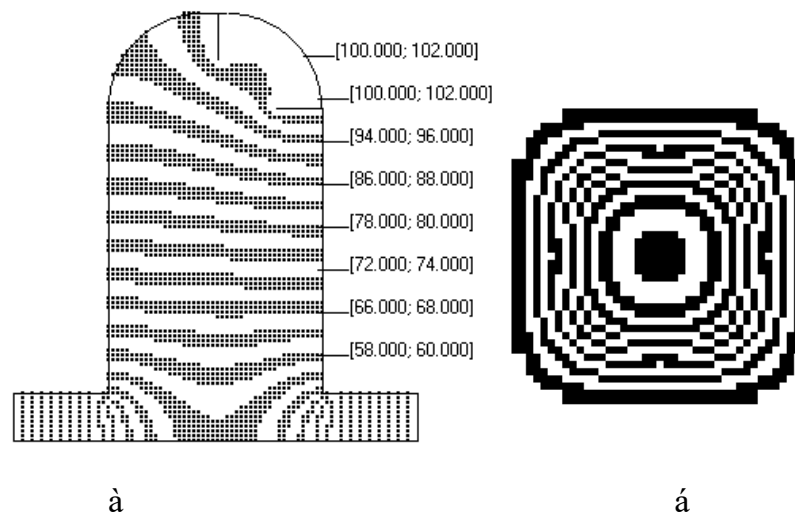


Рис. 3. Эквипотенциальные поля :
а — по центру модели; б — на дне модели.

$U_{\max} = 100$. Диапазон приращения $\Delta U = 2$. (U в относительных единицах)

Таким образом, описанная программа моделирования электрического поля в разрядном блоке ЭГИУ позволяет строить модели, состоящие из таких объемных фигур, как полусфера, цилиндр, конус и параллелепипед, задавать исходные данные и граничные условия I-го и II-го рода, получать поля распределения электрического потенциала и напряженности поля.

Список литературы.

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. - Л.: Машиностроение, 1986. - 253 стр.
2. Тараненко М.Е. Возможности пространственно-временного управления нагружением при электрогидравлической обработки // Кузнечно-штамповочное производство. 1996. №4. С.13-15
3. Самарский А.А. Теория разностных схем. - М: Наука, 1977.-656с.
4. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. - М: Энергия, 1970 - 370 с.
5. Буч Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения: Пер. с англ. - М.: Конкорд, 1992. - 512 с.
6. Страуструп Б. Язык программирования Си++: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1991. - 352 с.
7. WINDOWS 3.0. Справочник для программиста. Под редакцией Авдеева Е.В. - М.: ППИ НЦ, 1991.
8. Эргон Ж. Синтез изображений. Базовые алгоритмы: Пер. с франц. - М.: Радио и связь, 1993. - 216 с.