

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРОРАЗЯДАХ В ЖИДКОСТИ

А.Н. Потапенко, А.И. Штифанов

Электрогидравлический эффект как способ трансформации электрической энергии в механическую широко используется в самых различных областях науки и техники [1].

Процессы, протекающие в электрогидроимпульсных установках, использующих электрогидравлический эффект, в основном состоят из следующих операций: накопления электрической энергии в конденсаторной батарее, подключения специальным коммутирующим устройством высоковольтного напряжения к электродам, пробоя жидкости, образования разрядного канала с высоким давлением и возникновения гидродинамических явлений в жидкости в виде ударных волн и гидропотока от расширяющегося газообразного канала.

В настоящее время при электрогидравлической обработке материалов применяется оборудование, оснащенное новой разрядной системой в виде многоэлектродных разрядных блоков (МРБ) [2]. Функциональное назначение МРБ - это управление выделением высококонцентрированных потоков энергии в технологическом пространстве при импульсной обработке материалов.

Экспериментальные исследования МРБ [3] позволили впервые выявить существование неравномерного поля давлений на заготовке при осесимметричном расположении изолированного электрода в разрядной камере. При этом было установлено, что разрядный канал, например, образуется в одном радиальном направлении между центральным изолированным электродом и стержнем-тоководом, а максимальное давление на поверхности заготовки — в противоположном радиальном направлении. На основе полученных экспериментальных исследований, авторами работы [3] была разработана эмпирическая модель.

Цель данной работы — это исследование с помощью вычислительного эксперимента гидродинамических явлений для объяснения сложной физической картины волновых процессов, установленных экспериментально в работе [3].

**1. Постановка задачи.** Схема для моделирования нестационарных и неоднородных процессов в жидкости при электроразряде представлена на рис. 1.

Исследование процессов в ограниченном объеме разрядной камеры при электроразряде, выполняется с помощью модели сплошной среды. Для определения гидродинамического поля внутри одной из камер с двумя электродами  $\Gamma_6$  и  $\Gamma_7$ , погруженными в жидкость (см. рис. 1) необходимо найти решение краевой задачи.

Процессы, протекающие в жидкости будут определяться импульсным источником  $V(t)$ , образовавшемся в результате пробоя межэлектродного промежутка в виде разрядного канала с высоким давлением.

Из расчета электрического поля определяется граница  $V(t)$  как линия с максимальными значениями напряженности электрического поля между электродами, причем в этом случае параметры жидкости не изменяются, т.е. скорость частиц  $U$  в начале  $t_n$  и в конце  $t_k$  этого этапа расчета равна нулю:  $t_n = t_k = t_0$ ,  $U = 0$ .

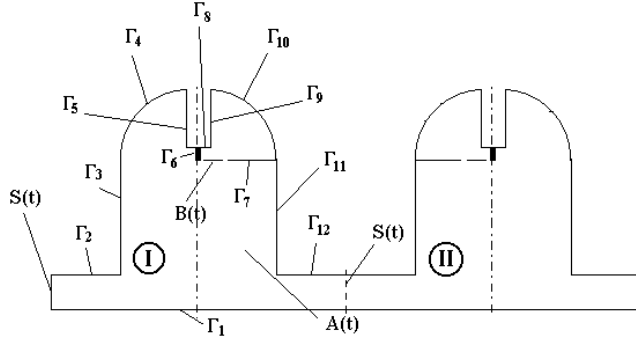


Рис. 1. Схема одной из разрядных камер МРБ (в разрезе):

$A(t)$  — жидкая передающая среда,  $B(t)$  — импульсный источник,  $S(t)$  — граница симметрии,  $\Gamma_1 \dots \Gamma_{11}$  — жесткие границы, причем  $\Gamma_6$  — центральный изолированный электрод,  $\Gamma_7$  — неизолированный электрод (стержень-токовод), связанный с корпусом разрядной камеры, I и II — номера разрядных камер.

Определение границы канала пробоя в жидкости связано с расчетом поля электрического потенциала  $\xi$  в области  $A(t_0)$ . Для расчета электрического поля используется уравнение Лапласа, которое в декартовой системе координат имеет вид:

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

На граница электродов  $\Gamma_6$  и  $\Gamma_7$  применяется уравнение Пуассона в виде

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{\rho_q}{\epsilon_0 \epsilon_r}, \quad (2)$$

где  $\rho_q$  — объемная плотность зарядов;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\epsilon_r$  — относительная диэлектрическая проницаемость жидкости.

Для представления параметров исследуемого процесса в безразмерных величинах исходя из закона подобия и размерности, а также выбрав за базовые величины разность потенциалов между электродами  $u = \xi_1 - \xi_2$ , характерный размер разрядной камеры  $l$  в поперечном направлении и величину  $c_1 = \rho_q / \epsilon_0 \epsilon_r$ , запишем их в следующем виде:  $\xi^* = \xi / u$ ;  $x^* = x / l$ ;  $y^* = y / l$ ;  $z^* = z / l$ ;  $c_0^* = \rho_q / \epsilon_0 \epsilon_r (1 / c_1)$ .

С учетом введенных безразмерных величин уравнение Лапласа будет иметь вид:

$$\Delta \xi^* = 0, \quad (3)$$

где  $\Delta$  — оператор Лапласа.

Аналогично уравнение Пуассона

$$\Delta \xi^* = c_0^*. \quad (4)$$

Граничные условия для расчета электрического поля следующие:

- на границе  $\Gamma_6$ :  $\xi^* = \text{const}$ ;
- на  $\Gamma_1, \dots, \Gamma_4, \Gamma_7, \Gamma_{10}, \dots, \Gamma_{12}$ :  $\xi^* = 0$ ;
- на  $\Gamma_5, \Gamma_8$  и  $\Gamma_9$ :  $\partial \xi^* / \partial n = 0$ ;
- на  $S(t_0)$ : условие непротекания тока в виде  $\partial \xi^* / \partial n = 0$ .

Учитывая, что напряженность электрического поля определяется как

$$E_i = \text{grad} \xi, \quad (5)$$

тогда в безразмерном виде компоненты напряженности электрического поля следующие:

$$E_x^* = \partial \xi^* / \partial x^*; \quad E_y^* = \partial \xi^* / \partial y^*; \quad E_z^* = \partial \xi^* / \partial z^*. \quad (6)$$

Зная компоненты напряженности  $E_i^*$ , можно определить модуль  $E^*$  в любой точке области  $A(t_0)$

$$E_i^* = \sqrt{(E_x^*)^2 + (E_y^*)^2 + (E_z^*)^2}. \quad (7)$$

Определив поле  $E_i^*$  в области  $A(t_0)$ , находим границу канала пробоя в жидкости между электродами  $\Gamma_6$  и  $\Gamma_7$  как линию с максимальными значениями  $E_i^*$  в виде границы  $B(t_0)$ .

Для исследования нестационарных и неоднородных процессов в жидкости, возникающих при высоковольтном электрическом разряде, используем подход, изложенный в [4].

Расчет гидродинамического поля ведем с использованием волнового уравнения, которое относительно потенциала скорости  $\psi$  имеет вид

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}, \quad (8)$$

где  $a_0$  - скорость звука в жидкости.

Учитывая, что в области жидкости  $A(t)$  имеется импульсный источник  $B(t)$ , то тогда на границе канала пробоя в жидкости необходимо использовать неоднородное волновое уравнение

$$\Delta \psi - \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = f(t), \quad (9)$$

где  $f(t)$  — потенциальная функция, учитывающая изменение давления в источнике  $B(t)$ .

Зная распределение потенциала  $\psi$  в области  $A(t)$  можно определить основные параметры исследуемого процесса при высоковольтном разряде в жидкости, а именно, давление, плотность и скорость жидкости как в [4].

Граничные условия для расчета гидродинамического поля следующие:

- на жестких границах  $\Gamma_1, \dots, \Gamma_5, \Gamma_8, \dots, \Gamma_{12}$ :  $\partial \psi / \partial n = 0$ ;

- на границе  $B(t)$ :  $\psi_B = \frac{1}{\rho_0} \int_0^t P_m \frac{t}{\tau} \exp(1 - \frac{t}{\tau}) dt$ ,

(15)

где  $P_m$  — максимальное давление в источнике  $B(t)$ ;  $\rho_0$  — исходная плотность жидкости;  $\tau$  — постоянный коэффициент, характеризующий процесс изменения давления в источнике  $B(t)$ ;

- на границе  $S(t)$ :

- если разрядная камера окружена по периферии другими разрядными камерами как в случае [3], то условие на границе  $\partial \psi / \partial n = 0$ ;

- если исследуется одна из разрядных камер в многокамерном разрядном блоке как в случае [3], то условие на границе  $\partial \psi / \partial t = 0$ ;

- в других случаях [3] используется комбинация условий на границе в виде  $\partial\psi/\partial n = 0$  и  $\partial\psi/\partial t = 0$ .

Начальные условия при  $t=t_0$  нулевые.

Для представления характерных гидродинамических параметров исследуемого процесса в безразмерном виде за базовые величины были выбраны  $\tau$ ,  $P_m$ ,  $l$ , где  $\tau$ ,  $P_m$  — параметры импульсного источника  $B(t)$ . Тогда безразмерные параметры определяются как  $F^* = F/F_6$ , где  $F_6$  — базовая величина.

**2. Результаты вычислений.** Для решения краевой задачи применен метод конечных разностей [5]. Исследуемая область жидкости представляется в виде дискретной (сеточной) области. В основу положена замена уравнений в частных производных для рассматриваемой краевой задачи их разностными аналогами.

В расчетах реализуется явная разностная схема Дюфорта-Франкела [5] для уравнений (8) и (9). Для уравнений Лапласа и Пуассона реализуется неявная разностная схема с использованием для их решения метода Либмана с ускоряющим множителем для оптимизации итерационного процесса [6].

Учитывая экспериментальные данные [3], рассмотрим процессы, протекающие при высоковольтном разряде в жидкости одновременно в полостях двух камер МРБ при условиях как на рис. 1, т.е. разрядные каналы смещены к оси симметрии между камерами.

Используя методику расчета электрического поля для краевой задачи, определим распределение электрического потенциала  $\xi$ , напряженность  $E$  и границу канала пробоя в жидкости.

На рис. 2 приведено характерное распределение эквипотенциальных линий электростатического поля при подключении к электродам высоковольтного напряжения с указанием границы канала пробоя в жидкости, соответствующей максимальному значению напряженности электрического поля  $E_m$  между электродами.

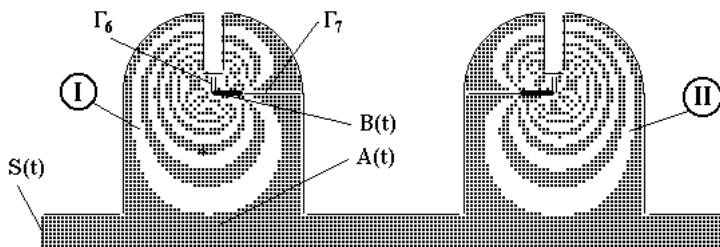


Рис. 2. Распределение эквипотенциальных линий электростатического поля в полости разрядной камеры для плоского варианта задачи с шагом  $\delta\xi^* = 0,04$

Вычислив место расположения импульсного источника  $B(t)$ , образовавшегося в жидкости в результате пробоя разрядного промежутка, а также учитывая характер изменения давления  $P(t)$  в колоколообразного закона в источнике  $B(t)$  [7], можно с помощью численных расчетов определить гидродинамические поля в полости разрядной камеры. При этом следует отметить, что в отличие от подхода [4], когда при решении неоднородного волнового уравнения параметры импульсного источника, а именно,  $P_m$  и  $\tau$ , характеризующие процесс изменения давления в нем, определялись в соответствии с [8], в данном случае крутизна переднего фронта нарастания давления при электроразряде в жидкости значительно выше

[7]. Исходя из обобщенных экспериментальных данных величина параметра  $\tau$  в зависимости (10) принималась равной  $10 \cdot 10^{-6}$  с., т.е. более, чем в 20 раз меньше, чем в [4].

На рис. 3 приведено характерное распределение давления  $P^*_{1n}$  по поверхности  $\Gamma_1$  (плоский вариант задачи) для разных моментов времени  $t_i^*$ , причем на рис.3,а показан процесс нарастания давления  $P^*_{1n}$  до максимальной величины  $P^*_{max}$ , а затем на рис.3,б показан процесс уменьшения давления  $P^*_{1n}$  от  $P^*_{max}$  до его некоторого значения. При этом следует отметить, что длина границы  $\Gamma_1$  в расчете принималась равной  $L = 7l$ , величина разрядного промежутка  $\Delta L = 0,15l$ , расстояние от электродов до границы  $\Gamma_1$  составляло  $H = 0,9l$  и расстояние между центральными линиями двух разрядных камер принималось равным  $L_{12} = 1,25l$ .

Анализ результатов численных расчетов (см. рис. 3) показал, что при смещении разрядного промежутка относительно центральной линии для первой (I) разрядной камеры вправо путем размещения неизолированного электрода  $\Gamma_7$  как показано на рис.1 и соответственно на рис.2, приводит к возникновению канала пробоя данного разрядного промежутка и появлению импульсного источника  $B(t)$  справа (см. рис. 3, поз. 1). Однако, максимальная величина давления  $P^*_m$  на преграде, а именно, внизу под импульсным источником  $B(t)$  смещается влево по отношению к центральной линии первой (I) разрядной камеры (см.рис. 3, поз. 4), т.е. наблюдается случай, при котором максимальное значение  $P^*_m$  не расположено непосредственно под источником  $B(t)$ , как следовало бы этого ожидать.

Аналогичные результаты расчетов одновременно наблюдаются и во второй (II) разрядной камере, когда неизолированный электрод  $\Gamma_7$  (см.рис.1) размещен слева от центральной линии. При этом канал пробоя разрядного промежутка и импульсный источник  $B(t)$  возникает слева относительно центральной линии камеры (II) (см. рис. 3, поз. 2), а максимальная величина давления  $P^*_{max}$  на преграде  $\Gamma_1$  возникает справа от этой линии (см. рис. 3, поз. 5).

В связи с тем, что разрядные камеры в МРБ сообщаются между собой (по поверхности  $S(t)$  как на рис.1), поэтому по оси симметрии между ними на преграде  $\Gamma_1$  возникает дополнительное экстремальное значение давления  $P^*_{1n}$  (см. рис.3,б, поз. 3).

Следует отметить, что данный эффект наблюдается только при определенных соотношениях размеров разрядной камеры ( $l$  и  $H$ ) и при варьировании параметров импульсного источника  $B(t)$  ( $P_m$  и  $\tau$ ) в некотором диапазоне значений. При параметрах  $B(t)$  как в [4] эффект не наблюдается.

Сравнение результатов численных расчетов, показанных на рис. 3 с экспериментальными данными [3] говорит об их качественном совпадении, так как в теоретическом плане решается задача для плоского варианта, а в экспериментах приводится карта полей давлений в виде линий изобар в относительных единицах для осесимметричной задачи. Однако, сопоставительный анализ по экстремальным значениям давления на преграде показал, что также имеется и количественное совпадение теоретических и экспериментальных результатов. В численных расчетах и экспериментальных данных фиксируются 3 экстремальных значения давления  $P^*_m$ . Два из них в обеих камерах равны и смещены относительно центральных линий для каждой из камер. Третий максимум лежит по оси симметрии между разрядными камерами и имеет значение меньшее, чем в камерах.



- 1 — смещение источника относительно центральной линии камеры I;
- 2 — смещение источника относительно центральной линии камеры II;
- 3 — максимум  $P_{in}^*$  и  $\eta_{in}^*$  при  $\eta_{in}^* = 1$ ;
- 4 — максимум  $P_{in}^*$  и  $\eta_{in}^*$  при  $\eta_{in}^* = 1$ ;
- 5 — максимум  $P_{in}^*$  и  $\eta_{in}^*$  при  $\eta_{in}^* = 1$ ;

$$6) t_5^* = 4,5, t_6^* = 5,0, t_7^* = 6,4, t_8^* = 6,7, t_9^* = 7,0$$

6

Сопоставительный анализ результатов расчета и данных эксперимента позволяет сделать вывод о том, что асимметричный относительно центральной линии камеры пробой разрядного промежутка в одной из ее зон в многокамерных разрядных блоках приводит к фокусированию волн от импульсного источника в виде разрядного канала с высоким давлением за счет их отражения от близко расположенных стенок камеры и концентрации импульса давления в прямо противоположной зоне исследуемой камеры по отношению к каналу пробоя. Таким образом, исходя из полученных результатов расчета следует вывод о том, что при проведении вычислительного эксперимента выявлен эффект самофокусировки волн с большим градиентом нарастания давления и концентрации энергии этих волн.

**3. Заключение.** Установленный эффект самофокусировки волн и концентрации их энергии необходимо учитывать специалистам в решении практических задач, связанных с обработкой материалов в электрогидроимпульсных установках. Кроме того, практической ценностью обладают разработанные алгоритмы и программное обеспечение для автоматизированных рабочих мест (АРМ) конструктора и технолога, которые необходимо использовать при проектировании специализированного импульсного оборудования и при разработке новых технологических процессов.

#### Список литературы.

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. - Л.: Машиностроение, 1986. - 253 стр.
2. Тараненко М.Е., Чебанов Ю.И., Князев М.К., Перский Е.Г. Новый энергонасыщенный электрогидравлический пресс // Кузнечно-штамповочное производство. 1992. №2. С.30-31
3. Чебанов Ю.И., Борисевич В.К., Князев М.К. Формирование поля давления на заготовке при штамповке на электрогидравлических установках // Кузнечно-штамповочное производство. 1996. №4. С.15-18
4. Shtifanov A.I., Potapenko A.N., El-Hammoudani A. Simulation of Dynamic Processes at Powdery Materials Pulse Loading // In book. Modeling. Compaction. Testing. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials. Part 7, MPIF, Washington, 1996. - P.3-12.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. - М: Наука, 1977.-656с.
6. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. - М: Энергия, 1970 - 370 с.
7. Богуславский Л.З., Кривицкий Е.В., Ромакин В.В. Моделирование электрического разряда в жидкости при параметрическом изменении элементов в контуре // Техническая электродинамика. 1990. №2. С.3-7.
8. Вовк В.Т., Софронов А.Г. Экспериментальное исследование поля давлений при взрыве газового заряда в гидросреде // В кн.: Импульсная обработка металлов давлением. Харьков, ХАИ, Вып. 10, 1982.- с. 105-108