

д.т.н. Корсунов К. А.  
(Восточноукраинский национальный  
университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина)

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ФОРМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В КАНАЛЕ ПЛАЗМОТРОНА

В статье приведены результаты компьютерного моделирования эволюции формы электрической дуги, находящейся в турбулентном потоке газа в канале плазмотрона. Использование статистического метода моделирования позволяет определить не только изменение границ столба дуги, но и последовательное развитие его как целого. Кроме того, разработанное программное обеспечение может быть использовано при проектировании плазмотронов и оценки их характеристик, исследовании устойчивости системы «источник питания-плазмотрон» и др.

**Ключевые слова:** моделирование, статистический метод, электрическая дуга, характеристики, турбулентный поток, плазмотрон.

**Введение.** Известно, что взаимодействие электрической дуги с потоком газа в разрядном канале плазмотрона характеризуется сильной взаимосвязью гидродинамических, электродинамических и тепловых процессов. Это приводит, в частности, к пульсациям и колебаниям дуги, причиной которых являются гидродинамическая неустойчивость газового потока, взаимодействие дуги с собственным магнитным полем и стенкой канала, вращательное перемещение прианодного участка столба дуги, шунтирование и другие процессы [1]. В результате электрическая дуга имеет довольно сложную форму, которая постоянно изменяется с течением времени (рис. 1).



Рисунок 1 - Скоростная фотография дуги в потоке газа [2]

В плазмотронах с гладким цилиндрическим выходным электродом с самоупа-

навливающейся длиной дуги, которые находят применение в процессах обработки материалов, а также в металлургическом, плазмохимическом и других производствах, изменение формы дуги приводит к большим пульсациям напряжения, тока дуги и параметров плазменной струи. Задача о моделировании эволюции формы дуги является достаточно сложной с математической точки зрения и ее решают, как правило, классическими численными методами, которые не позволяют учесть все многообразие факторов, влияющих на геометрию дуги.

**Цель работы** заключается в применении метода статистического моделирования, разработанного и представленного в [2], к описанию эволюции формы дуги в канале плазмотрона с самоупаавливающейся длиной дуги.

Метод статистического моделирования поведения электрической дуги заключается в следующем. Принимается, что движение элемента дуги складывается из движения вдоль оси со средней скоростью и хаотических пульсаций в поперечном направлении, а деформированную ось проводящего канала можно рассматривать как пространственно-временную случайную кривую. Введя декартову систему координат в плоскости, перпендикулярной оси потока (рис. 2), положение дуги и ее перемещение в этом сечении описывается некоторым множест-

вом  $K_t$  узлов решетки  $R_2$ , занятых проводящим каналом дуги, а возникновение и распад окружающих дугу турбулентных молей можно описать некоторым случайным множеством  $W_r(t)$ . При этом поперечные пульсации дуги заключаются в дискретном перемещении (блуждании) элемента столба дуги по узлам решетки, а их вероятностно-множественная модель допускает представление одномерным процессом случайного перемещения. Выбор случайного множества в качестве основы построения модели продиктован необходимостью в простом и достаточно полном описании развития пространственно распределенного процесса блуждания дуги.

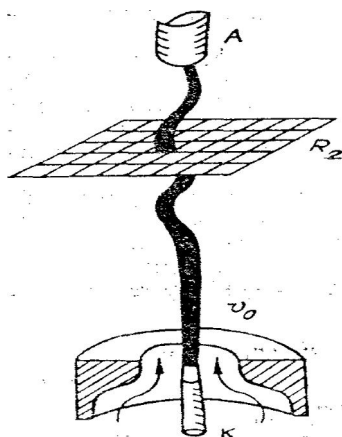


Рисунок 2 - Дуга в турбулентном потоке газа [2]

В силу этого процесс случайного перемещения можно определить в виде:

$$K_{t+1} = \bigcup_{r \in K_t} W_r(t), \quad (1)$$

где  $W_r(t)$  — случайное множество локальных перемещений в окрестностях узла  $r$  в момент времени  $t$ , характеризующее влияние турбулентных молей на пульсации дуги. Множество задается вероятностью покрытия узлов решетки в единичной окрестности  $r \equiv D_r^1$ , т.е.  $\forall r \in R_2$  и  $\forall x \in D_r^1$  заданы  $\pi_{W_r}(x) = P_r$ , причем

$$\sum_{r \in D_r^1} \pi_{W_r}(x) = 1. \quad (2)$$

Тогда алгоритм статистического моделирования процесса (1), предназначенный для компьютерного моделирования, состо-

ит из последовательного ( $t = 0, 1, 2, 3, \dots, T$ ) моделирования случайного множества  $K_{t+1}$ , глобальное развитие которого является результатом его локальных изменений по уже известному  $K_t$  с учетом  $W_r$ . При этом задание множества  $W_r$  является отдельной задачей и зависит от конкретных условий горения дуги [2].

Данный метод был использован для разработки программного обеспечения, предназначенного для компьютерного моделирования эволюции формы дуги и позволяющего рассчитывать и отображать пространственную конфигурацию дуги, горящую в плазмотроне косвенного действия со стержневым катодом и гладким выходящим цилиндрическим анодом в зависимости от геометрических размеров разрядного канала плазмотрона и режима его работы (тока дуги, давления на срезе анода и расхода воздуха).

В основе расчетных программ лежит модель процесса горения дуги в канале плазмотрона. Известно, что особенностью плазмотронов косвенного действия является наличие двух участков течения электродуговой плазмы в разрядном канале, которые отличаются по характеру протекающих физических процессов. На начальном участке, длина которого определяется местом встречи турбулентного пограничного слоя с тепловым слоем дуги, развивающийся на стенке канала турбулентный пограничный слой не оказывает на дугу практически никакого влияния. На этом участке столб дуги не имеет сильных поперечных пульсаций и сохраняется постоянная напряженность электрического поля. В месте встречи турбулентного пограничного слоя и дуги и вниз по потоку электродуговой столб под действием турбулентных пульсаций, генерируемых в пограничном слое, начинает хаотически колебаться.

Длина начального участка определяется обобщенной зависимостью [3]:

$$\frac{Z_{н.у.}}{d^2 Re^{0.27}} = \frac{42}{1 + 1,3 \cdot 10^{-3} K^{-1,1}}, \quad (3)$$

где  $K = \frac{d\sqrt{\mu \cdot h \cdot \sigma}}{I}$ . Зависимость (3) с точностью до 25% справедлива в диапазоне параметров:  $Re = 8 \cdot 10^3 - 10^5$ ,  $\frac{I}{d} = (1-10) \cdot 10^4$  А/м,  $d = 1 - 2$  см.

Величина напряженности электрического поля на начальном участке находится по формуле

$$E = 2,64 \cdot 10^{-2} \frac{G^{0,15} p^{0,13}}{d^{1,032}} \left( 335 - \frac{I}{d} \cdot 10^{-2} + 5,13 \cdot 10^{-7} \frac{I^2}{d^2} \right), \quad (4)$$

а на турбулентном участке определяется соотношением

$$E_T \cdot d = 115 \left( \frac{I}{d} \right)^{-0,23} \left( \frac{G}{d} \right)^{0,47} (pd)^{0,2}, \quad (5)$$

справедливым в пределах:  $S_I = 35 \div 540$ ,  $Re = (2,7 \div 11) \cdot 10^4$ ,  $K_n = (1,3 \div 11) \cdot 10^{-5}$ , где  $S_I = 0,0179 \frac{I}{d}$ ,  $K_n = 0,11(pd)^{-1}$  [4].

На начальном участке принимается, что столб дуги располагается на оси канала. На турбулентном участке колебания столба дуги описываются с помощью статистического метода, при этом множество узлов решетки  $R_2$ , занятых дугой, обозначается  $K_t^1$ , остальной поток газа -  $K_t^2$ . Предполагая, что с течением времени ( $t = 0, 1, 2, 3, \dots, T$ ) в каждой точке потока возникает турбулентный моль, который мгновенно перескакивает в соседний узел и исчезает, совокупность направлений перемещения молей будем приближенно считать изотропной. Кроме того, зададим условия взаимодействия дуги с турбулентными молями потока, которые приводят к перераспределению областей, занятых потоком газа и дугой:

$$K_{t+1}^1 = K_t^1 - A_t + B_t,$$

$$K_{t+1}^2 = K_t^2 - B_t + A_t, \quad (6)$$

где  $A_t(B_t)$  - в данном случае, множество узлов  $R_2$ , которое к моменту времени  $t+1$  занимает турбулентный поток (протягивающий канал).

Принятые предположения позволяют моделировать процесс случайного взаимодействия методом Монте-Карло. В этом случае вероятности покрытия узлов решетки в единичной окрестности равны между собой:

$$P_r = \frac{1}{\ell}, \quad (7)$$

где  $\ell$  - число степеней свободы.

Потенциал дуги в сечении  $Z_i$  определяется как

$$\varphi(Z_i) = U_k + U_{Н.У.} + \varphi(Z_{i-1}) + E_T \cdot L_{Z_i}, \quad (8)$$

где  $U_k$  - катодное падение потенциала;  $U_{Н.У.} = E \cdot Z_{Н.У.}$  - напряжение на начальном участке;  $L_{Z_i}$  - длина участка дуги от сечения  $Z_{i-1}$  до  $Z_i$ .

Как известно, если выполняется условие  $\Delta U(Z_i) \geq U^*$  (где  $\Delta U(Z_i) = U - \varphi(Z_i)$ ,  $U$  - потенциал анода), то происходит пробой и дуга замыкается в сечении  $Z_i$  на стенку канала [5]. Это приводит к изменению длины дуги и напряжения на дуге, которое становится равным  $U = \varphi(Z_i)$ . Напряжение пробоя согласно [5] определяется

$$U^* = 3,33 \cdot 10^4 \left( \frac{Gh_0}{IU_{\min}} \cdot \delta^* \right)^{0,9}, \quad (9)$$

где для турбулентного режима  $\delta^* = 3,3 \cdot 10^{-2}$  см.

Полное напряжение на дуге, зависящее от геометрии канала, тока и расхода газа, в начальной итерации  $t = 0$  задается с помощью обобщенной зависимости

$$U = 1290 \left( \frac{I^2}{Gd} \right)^{-0,15} \left( \frac{G}{d} \right)^{0,30} (pd)^{0,25}, \quad (10)$$

которая справедлива в пределах [1]:

$$10^7 < \frac{I^2}{G \cdot d} < 4 \cdot 10^{10} \frac{A^2 \cdot c}{кг \cdot м},$$

$$0,1 < \frac{G}{d} < 2,0 \frac{кг}{м \cdot c}, \quad 500 < pd < 3500 \text{ Па}.$$

Известно, что в турбулентном ядре перенос тепла осуществляется за счет перемещений вихревых образований, а в ламинарном подслое – за счет молекулярной теплопроводности, поэтому тепловое сопротивление ламинарного подслоя больше, чем в ядре. Это позволяет считать, что проникновение дуги в ламинарный подслоя затруднено и, следовательно, использовать границу ламинарного подслоя в качестве границы области возможных положений дуги в процессе ее турбулентных пульсаций. Для ее нахождения будем ис-

пользовать условие устойчивости ламинарного подслоя:

$$\frac{\delta \sqrt{\tau_{\omega} \cdot \rho_0}}{\mu} = 11,5, \quad (11)$$

и закон Блазиуса  $\frac{C_f}{2} = 0,04 \cdot Re^{-0.25}$ , где

$$C_f = \frac{2\tau_{\omega}}{\rho_0 \cdot v_0^2}$$

– напряжение трения на стенке канала.

Программное обеспечение (Windows 2000/XP) имеет интерфейс пользователя, который включает три окна: главное окно (управляющее окно программы), окно с моделью плазмотрона, окно вывода графической информации (рис. 3,4).

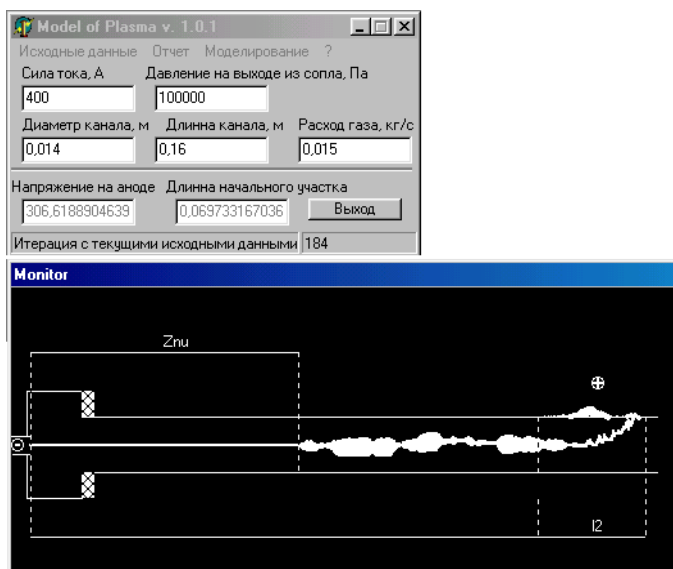


Рисунок 3 - Главное окно программы и окно с моделью плазмотрона

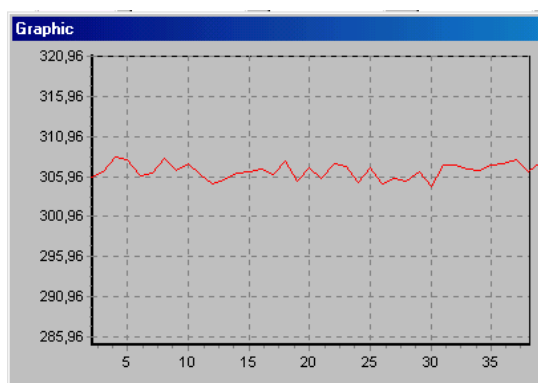


Рисунок 4 - Окно графика  $U = f(t)$  (зависимость напряжения на дуге от количества итераций)

Для сравнения результатов компьютерного моделирования при помощи разработанного программного обеспечения с экспериментальными данными было проведено моделирование процесса горения дуги в канале плазмотрона. Моделировалось горение дуги в плазмотроне при следующих исходных параметрах:  $I = 400$  А,  $p = 10^5$  Па,  $d = 0,014$  м,  $L = 0,16$  м,  $G = 0,015$  кг/с.

В результате выполнения моделирования процесса горения дуги в канале плазмотрона с самоустанавливающейся длиной дуги получены следующие данные:

- отношение длины дуги к длине канала составляет 0,52;
- частота посещений опорным пятном дуги разных участков поверхности канала отображается на модели в виде гистограммы, имеющий профиль, характерный при эрозии электрода (анода);

-  $U_{\max} = 338,953$ В ;

-  $U_{\min} = 243,524$ В ;

- размах колебаний напряжения на дуге, определенный по формуле

$$\varepsilon_n = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}} \cdot 100\%, \text{ составил } 28,5\%,$$

что соответствует характерным значениям пульсаций напряжения в плазмотронах с самоустанавливающейся длиной дуги [5]. Так, например, на рис. 5 показана осциллограмма переменной составляющей напряжения на дуге, полученная на электродуговом плазмотроне при расходе воздуха

$1,3 \cdot 10^{-3}$  кг/с и силе тока дуги 130 А. Размах колебаний напряжения, обусловленных крупномасштабным шунтированием дуги, составил порядка 30% от его среднего значения.

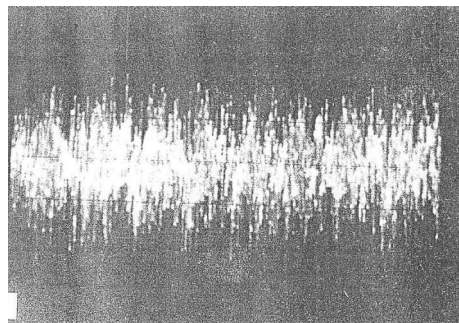


Рисунок 5 - Осциллограмма переменной составляющей напряжения на дуге при силе тока дуги  $I = 130$  А (масштаб горизонтальной развертки  $t_r = 2 \cdot 10^{-3}$  с/дел)

**Выводы.** Сравнение результатов моделирования эволюции формы электрической дуги в канале плазмотрона с гладким выходным электродом с экспериментальными данными показывает их удовлетворительное согласие. Таким образом, что разработанное программное обеспечение может быть использовано при проектировании плазмотронов и оценки нестационарной составляющей их электрических и тепловых характеристик, исследовании устойчивости системы «источник питания-плазмотрон» и др.

### Библиографический список

1. Даутов Г.Ю. Плазматроны со стабилизированными электрическими дугами / Г.Ю. Даутов, В.Л. Дзюба, И.Н. Карп. – К.: Наукова думка, 1984. – 168 с.
2. Теория термической электродуговой плазмы / Жуков М.Ф., Девятков Б.Н., Новиков О.Я. и др. – Новосибирск: Наука, 1987. – Ч.2. Нестационарные процессы и радиационный теплообмен в термической плазме. – 287 с.
3. Аньшаков А.С. Теплообмен в электродуговой камере плазмотрона линейной схемы / А.С. Аньшаков, В.П. Лукашов, В.Н. Фокин // Генерация потоков электродуговой плазмы. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1987. – С. 33-53.
4. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками / Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Засыткин И.М. и др. – Новосибирск: Наука, 1981. – 222 с.
5. Жуков М.Ф. Прикладная динамика термической плазмы / М.Ф. Жуков, А.С. Коротеев, Б.А. Урюков. – Новосибирск: Наука, 1975. – 298 с.

Стаття поступила в редакцію 09.10.13.

д.т.н. Корсунов К. А. (СНУ ім. В. Даля, м. Луганськ, Україна)

### КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕВОЛЮЦІЇ ФОРМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ В КАНАЛІ ПЛАЗМОТРОНА

У статті наведено результати комп'ютерного моделювання еволюції форми електричної дуги, що знаходиться в турбулентному потоці газу в каналі плазмотрона. Використання статистичного методу моделювання дозволяє визначити не тільки зміну меж стовпа дуги, а й послідовний розвиток його як цілого. Крім того, розроблене програмне забезпечення може бути використане при проектуванні плазмотронів та оцінки їх характеристик, дослідженні стійкості системи «джерело живлення-плазмотрон» та ін.

**Ключові слова:** моделювання, статистичний метод, електрична дуга, характеристики, турбулентний потік, плазмотрон.

Korsunov K. A. (Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Lugansk, Ukraine)

### COMPUTER MODELS OF THE FORM OF AN ELECTRIC ARC IN THE CHANNEL OF THE PLASMATRON

The results of a computer simulation of the evolution of an electric arc forms which is in a turbulent gas flow in the channel of the plasmatron. Using statistical modeling method to determine not only the change in the boundaries of the arc column, but also the gradual development of it as a whole. In addition, the developed software can be used in the design of plasmatrons and evaluation of their performance, stability analysis of the "supply-plasmatron", et.

**Keywords:** modeling, statistical method, electric arc, characteristics, turbulent flow, the plasmatron.