

Г.А. Барбашова

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КАМЕРЕ СТРУЙНОГО
ГЕНЕРАТОРА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ**

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-а, г. Николаев, 54018, Украина*

Генераторам высокоскоростных струй (гидропушкам, импульсным водометам и др.) посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ (например, [1–4]). Подробно описан принцип действия этих устройств. В настоящей работе при помощи численного эксперимента исследуются гидродинамические процессы в камере электроразрядного устройства (ЭРУ), которое предложено использовать для снижения остаточных напряжений в сварных соединениях [5].

ЭРУ представляет собой электроимпульсный водомет [2]. Длина цилиндрической части $H_{ц} = 60$ мм, радиус $R_{ц} = 30$ мм, угол при вершине конуса α изменялся от 30° до 70° (соответственно длина конусной части устройства – от 97 до 37 мм, а высота разрядной камеры – от 157 до 97 мм), радиус на срезе сопла $R_{от} = 4$ мм. Водомет может быть полностью заполнен водой или иметь слой воздуха высотой h_v .

При выполнении работы были приняты следующие допущения. Электроды и ближе к ним основание цилиндра располагались на таком малом расстоянии друг от друга, что область жидкости, находившуюся между ними, можно было не рассматривать. Канал разряда в начальный момент времени имел форму полусферы (рис. 1). Ее объем равнялся объему цилиндра, высота которого равнялась расстоянию между электродами, а радиус принимался равным 2 мм (согласно экспериментальным данным [6] при самопробое в воде радиус канала разряда в начальный момент времени канальной стадии разряда может находиться в диапазоне от 0,7 до 2 мм). Камера устройства была заполнена идеальной сжимаемой жидкостью, канал разряда – идеальной плазмой. Стенки камеры абсолютно жесткие.

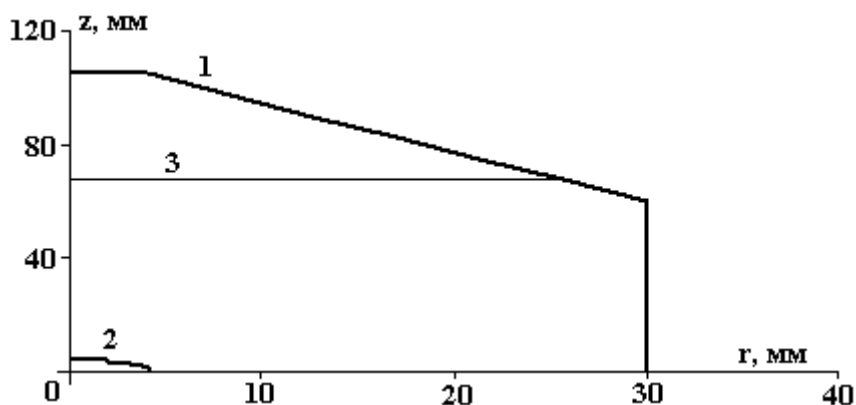


Рис. 1. Схема камеры струйного генератора: 1 – стенка камеры; 2 – канал разряда при $t = 0$; 3 – свободная поверхность до прихода ударной волны

В соответствии с принятыми допущениями математическая модель, описывающая гидродинамические процессы в камере ЭРУ, включает в себя:

– систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики, записанную в цилиндрической системе координат [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(r \cdot \rho)}{\partial t} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_r)}{\partial t} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z \cdot v_r)}{\partial z} + \frac{\partial[r \cdot (\rho \cdot v_r^2 + p)]}{\partial r} = p, \\ \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z)}{\partial t} + \frac{\partial[r \cdot (\rho \cdot v_z^2 + p)]}{\partial z} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial(r \cdot e)}{\partial t} + \frac{\partial[r \cdot (e + p) \cdot v_z]}{\partial z} + \frac{\partial[r \cdot (e + p) \cdot v_r]}{\partial r} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

– двучленное уравнение состояния

$$\varepsilon = [p - c_0^2(\rho - \rho_0)] / [\rho(\kappa - 1)], \quad (2)$$

где t – время; r, z – цилиндрические координаты; v_r, v_z – радиальная и осевая компоненты вектора скорости жидкости; p – давление; ρ – плотность; $e = \rho[\varepsilon + (v_r^2 + v_z^2)/2]$; ε – удельная внутренняя энергия; ρ_0, c_0 – плотность и скорость звука в покоящейся жидкости; $\kappa = 7,15$;

– граничные условия;

1) на внутренней границе расчетной области – контактном разрыве плазма–вода – задается давление, которое определяется из уравнения баланса энергии [8]:

$$\frac{1}{(\gamma - 1)} \cdot \frac{d(p_k V_k)}{dt} + p_k \cdot \frac{dV_k}{dt} = N(t), \quad (3)$$

где p_k, V_k – давление в канале разряда и его объем; $\gamma = 1,26$; $N(t)$ – закон ввода мощности в канал разряда;

2) внешней границей расчетной области сначала появляется образующаяся при расширении плазменной полости ударная волна, а по достижении ее фронтом воздушного слоя или стенки разрядной камеры границей становится свободная поверхность или неподвижная жесткая стенка; на ударной волне должны быть выполнены условия динамической совместности [7]:

$$\begin{aligned} [\rho] D - [\rho v_n] &= 0, \\ [\rho v_n] D - [\rho v_n^2 + p] &= 0, \\ [\rho(\varepsilon + v_n^2/2)] D - [\rho v_n(\varepsilon + v_n^2/2) + p v_n] &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где v_n – нормальная составляющая вектора скорости жидкости; D – скорость ударной волны; $[f] = f_1 - f_2$; f_1, f_2 – значения функции слева и справа от ударной волны;

на свободной поверхности:

$$p = 0; \quad (5)$$

на неподвижной жесткой стенке:

$$v_n = 0. \quad (6)$$

На срезе сопла после прихода возмущения давление жидкости равно нулю.

В начальный момент времени параметры жидкости равны своим значениям в невозмущенной среде. Начальная скорость канала разряда равна нулю, а давление в нем превышает давление в окружающей среде на 1 МПа.

Система уравнений (1)–(2) решается конечноразностным методом Годунова [8]. Расчетная сетка состоит из веера неподвижных лучей, выходящих из начала координат (рис. 1), и перемещающихся вдоль них линий, первой из которых является стенка канала разряда, а последней – внешняя граница расчетной области. Внутренние узлы сетки расположены вдоль лучей равномерно. Давление в канале разряда определяется из уравнения (3) двушаговым методом Эйлера. Объем канала разряда и его производная по времени вычисляются по координатам поверхности канала и скорости его расширения, полученным при решении задачи о распаде произвольного разрыва [7] на контактной границе плазма–вода. Алгоритм решения задачи подробно описан в [9].

Закон ввода мощности $N(t)$ (рис. 2) получен экспериментально при напряжении заряда $U_0 = 40$ кВ, индуктивности электрической цепи $L = 6$ мкГн и емкости конденсаторной батареи $C = 12$ мкФ.

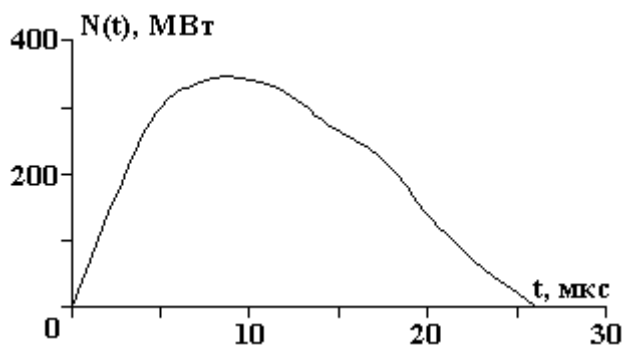


Рис. 2. Закон ввода мощности в канал разряда

Анализ полученных результатов показал, в частности, следующее.

После подачи напряжения на электроды происходит пробой жидкости, в результате чего образуется заполненная плазмой полость – канал разряда. Давление в плазме (максимальное значение равно 800 МПа) значительно превышает давление в жидкости. Амплитуда скорости расширения канала разряда достигает значений 600–900 м/с. Это приводит к образованию ударной волны. До момента времени прихода ее фронта к стенке разрядной камеры течение жидкости одномерно. В дальнейшем характер течения определяется суперпозицией волн давления, излучаемых каналом разряда, и волн, отраженных от стенки камеры ЭРУ и свободной поверхности. В результате волновых процессов, перемещения жидкости в направлении среза сопла и истечения жидкости из водомета происходит разрушение жидкости – образуются «отколы» [2], которые могут закрываться благодаря волнам сжатия. «Отколы» впервые появляются у днища камеры (вблизи канала разряда) и распространяются по всему объему по мере перемещения жидкости к срезу сопла. Как и в [2], полагаем, что разрушенная область жидкости является сплошной средой, плотность которой меньше плотности невозмущенной жидкости, а давление равно нулю.

После прихода фронта ударной волны к границе вода–газ начинается движение свободной поверхности и жидкости к срезу сопла. Скорость жидкости повышается в процессе движения, достигая максимума у среза. Ударная волна приходит к различным участкам свободной поверхности в разное время. Кроме того, разрядная камера сужается, что вызывает образование направленных к оси симметрии течений (радиальная составляющая вектора скорости меньше нуля) и к повышению давления. Поэтому свободная поверхность сильно деформируется, выпучиваясь возле оси симметрии. У среза сопла происходят резкое падение радиальной составляющей вектора скорости жидкости и скачок давления, что свидетельствует о слиянии двух симметричных течений.

Результаты расчетов течения в камере при разных значениях угла при вершине конуса (из приведенного выше диапазона) показали, что наибольшее давление в струе жидкости при выходе ее из сопла водомета достигается при $\alpha = 55\text{--}60^\circ$. Поэтому основные расчеты выполнялись при $\alpha = 60^\circ$ (высота конуса 45 мм, высота разрядной камеры 105 мм).

На рис. 3 показана зависимость от времени давления (a), радиальной (b) и осевой (c) компонент вектора скорости жидкости в ячейке расчетной сетки, примыкающей к оси симметрии устройства и к внешней границе расчетной области (сначала это ударная волна, потом – свободная поверхность), при значениях высоты воздушного слоя 20 (кривые 1), 30 (кривые 2) и 40 мм (кривые 3), а также в полностью заполненной водой камере (кривые 4). Изменение положения свободной поверхности в процессе движения в разрядной камере показано на рис. 4.

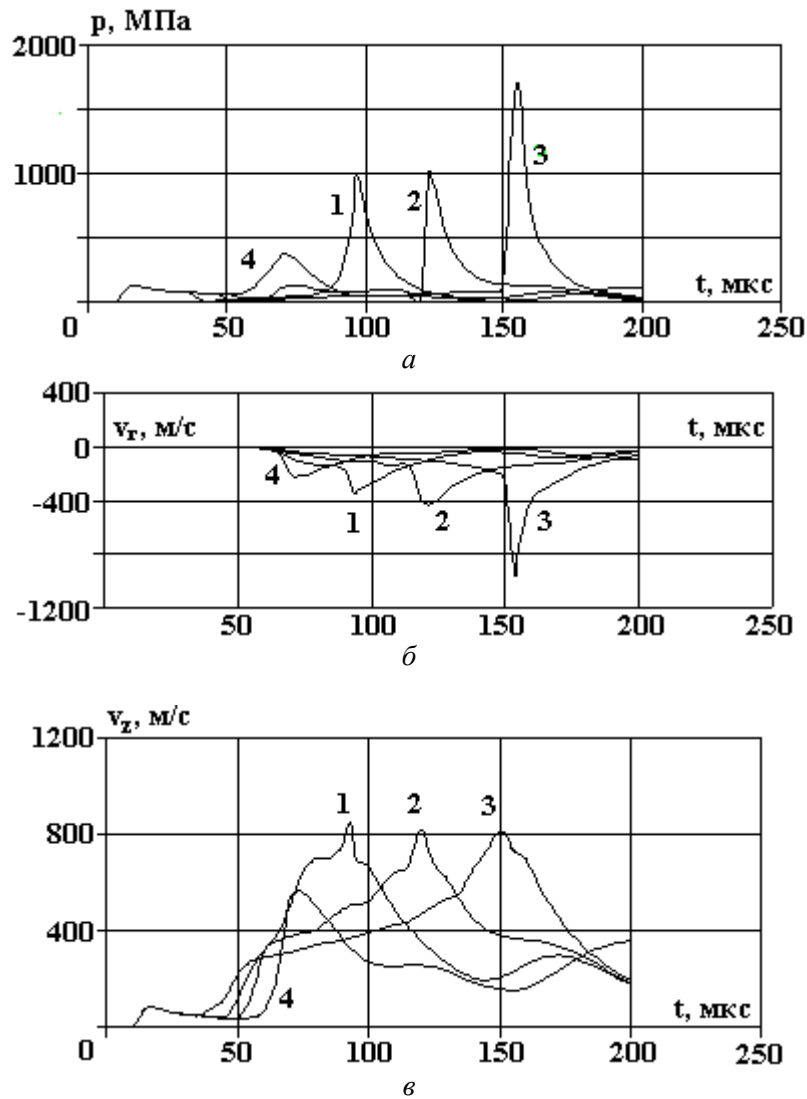


Рис. 3. Давление (а), радиальная (б) и осевая (в) компоненты вектора скорости жидкости в ячейке, прилегающей к оси симметрии и внешней границе. h_b , мм: 1 – 20; 2 – 30; 3 – 40; 4 – 0

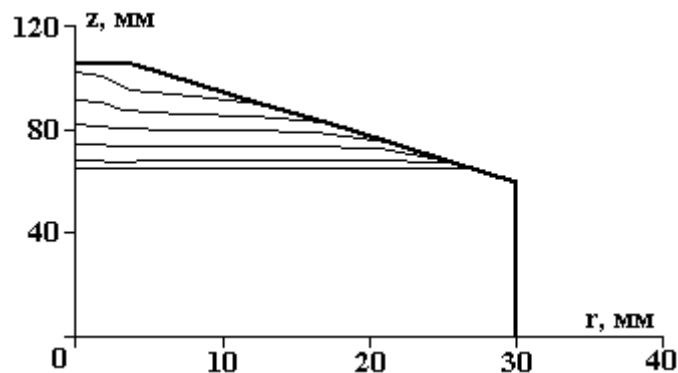


Рис. 4. Положение свободной поверхности в разрядной камере в различные моменты времени

Как следует из приводимых данных, гидродинамические характеристики при значениях высоты воздушного слоя 20 и 30 мм отличаются несущественно. А при $h_b = 40$ мм скачок давления и радиальной компоненты вектора скорости (по абсолютной величине) в полтора раза больше. В этом случае создается необходимое для снижения остаточных напряжений давление жидкости, поэтому все основные расчеты были выполнены при $h_b = 40$ мм. Этот результат хорошо согласуется с экспериментальными данными.

При увеличении энергии, вводимой в канал разряда, максимумы скорости и давления жидкости возрастают и достигаются быстрее. Например, увеличение запасенной в конденсаторной батарее энергии в два раза (ранее запасенная энергия равнялась 10 кДж) при $h_b = 20$ мм приводит к повыше-

нию максимума скорости жидкости в полтора и амплитуды давления в два раза. А при высоте воздушного слоя 30 и 40 мм полученные при расчете нагрузки на стенку разрядной камеры превосходят предел прочности материала.

В работе исследовалось также влияние параметров электрической цепи на гидродинамические процессы в разрядной камере. Напряжение заряда U_0 полагалось равным 20–50 кВ, величина индуктивности электрической цепи L изменялась от 4 до 16 мкГн (при каждом значении напряжения), а емкость конденсаторной батареи определялась из соотношения

$$E_0 = 0,5 \cdot C \cdot U_0^2,$$

где E_0 – запасаемая энергия, равная 10 кДж.

Длительность первого полупериода электрического разряда τ и введенная за это время энергия E вычислялись по формулам [10]:

$$\tau = \pi \cdot \sqrt{L \cdot C} \cdot (1 + \eta^3) \text{ при } \tau \leq 35 \text{ мкс},$$

$$\tau = \pi \cdot \sqrt{L \cdot C} \cdot (1 + \eta^4 \cdot 0,5) \text{ при } \tau > 35 \text{ мкс},$$

$$E = \eta \cdot E_0,$$

$$\eta = \left(\frac{\pi \cdot A \cdot l^2}{U_0^2 \sqrt{L \cdot C}} \right)^{1/3},$$

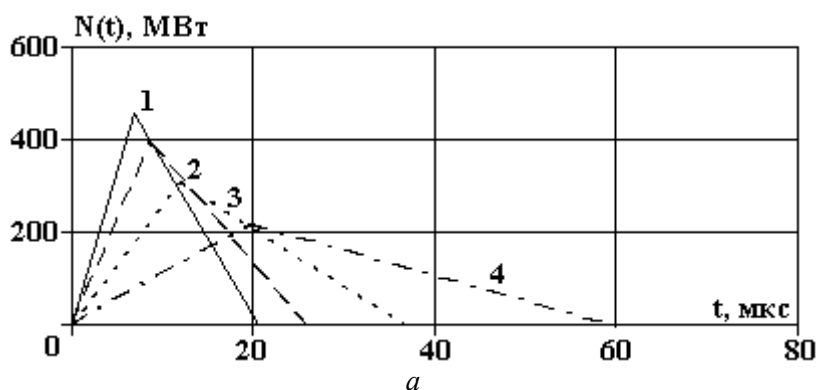
где A – искровая постоянная, равная $10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{см}^{-2}$; l – длина межэлектродного промежутка.

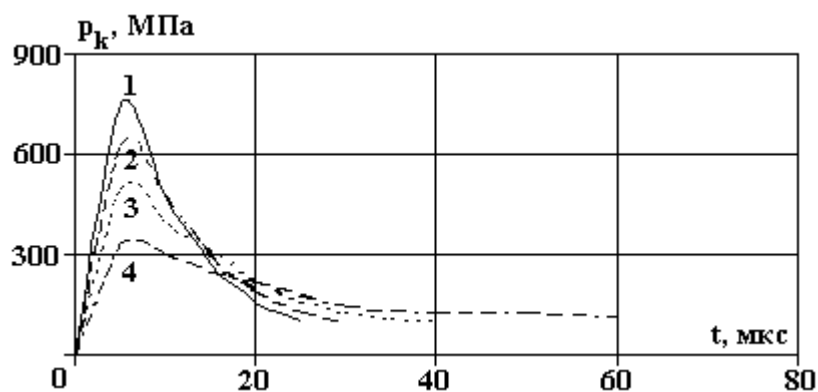
Доля энергии η , вводимой в течение первого полупериода электрического разряда, не превышала 0,6. Поэтому разряды колебательные [10] и закон ввода мощности согласно [8] можно записать следующим образом:

$$N(t) = \begin{cases} 6 \cdot t \cdot E / \tau^2, & 0 \leq t \leq \tau/3, \\ 3 \cdot (1 - t/\tau) \cdot E / \tau, & \tau/3 \leq t \leq \tau, \\ 0, & \tau < t. \end{cases}$$

На рис. 5 представлены закон ввода мощности в канал разряда (а) и давление в канале (б) в первый полупериод времени ввода энергии при значениях напряжения заряда 50 (кривые 1), 40 (кривые 2), 30 (кривые 3) и 20 кВ (кривые 4). Индуктивность электрической цепи во всех случаях равна 4 мкГн.

При увеличении напряжения в разрядном контуре уменьшается длительность первого полупериода разряда и увеличиваются максимальные значения мощности, то есть повышается крутизна нарастания мощности (рис. 5,а). Следовательно, растет амплитуда давления в канале разряда и в окружающей его жидкости. Исследования показали, что наиболее благоприятные условия для формирования мощной струи в разрядном устройстве создаются при кратковременных [10] зарядах с большой крутизной нарастания мощности. Полученные в ходе численного эксперимента результаты свидетельствуют о том, что такие условия можно достигнуть при значениях напряжения заряда 45–50 кВ.





б

Рис. 5. Закон ввода мощности (а) и давление в канале разряда (б) при различных значениях напряжения заряда U_0 , кВ: 1 – 50; 2 – 40; 3 – 30; 4 – 20

Таким образом, для обеспечения наиболее эффективной работы струйного генератора необходимо, чтобы угол при вершине сопла (конусной части) устройства составлял $55\text{--}60^\circ$, а воздушный слой – 40 мм. При выборе параметров электрической цепи следует ориентироваться на те, которые обеспечивают крутой фронт нарастания мощности и кратковременность разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1422371 СССР, МКИ³ Е 21 с 45/00. Импульсный водомет/Б.В.Войцеховский, Э.А.Антонов, А.В.Шевченко. №694975/22–3; Заявлено 19.12.60 // Открытия. Изобретения. 1972. № 8. С. 230.
2. Атанов Г.А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. Киев, 1987.
3. Комельков В.С., Афиногенов Е.П., Малюшевский П.П. Генерация направленных ударных волн сильноточными импульсными разрядами в жидкости // Электричество. 1992. № 12. С. 40–45.
4. Головки Ю.Н. Численное исследование гидродинамических процессов при подводных искровых разрядах в ограниченных областях: Автореф. дис... канд. физ.-мат.наук / АН УССР, Ин-т геотехнической механики. Киев, 1983.
5. Юрченко Е.С. Сварка и снижение остаточных напряжений импульсными высокоскоростными струями жидкости // Электронная обработка материалов. 2004. № 2. С. 23–26.
6. Жекул В.Г. Экспериментальные исследования начальных характеристик канальной стадии разряда в воде // Подводный электрический взрыв. Киев, 1985.
7. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под. ред. С.К.Годунова. М., 1976.
8. Наугольных К.А. Электрические разряды в воде / К.А. Наугольных, Н.А. Рой. М., 1971.
9. Барбашова Г.А., Иванов А.В., Каменская Л.А. Исследование давления жидкости в жесткой камере при подводном искровом разряде // Гидромеханика. 1987. Вып. 56. С. 16–20.
10. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев, 1979.

Поступила 20.05.05

Summary

Hydrodynamic processes in the chamber of fluid oscillator are investigated using the method of numerical experiment. In particular, the influence of chamber geometry, the presence of air layer and its height in it and parameters of electric circuit on the characteristics of fluid jet on its outlet from the device are examined.