

# Исследование гидродинамических процессов при многопульсационном законе ввода энергии в канал электрического разряда в жидкости

А. И. Вовченко, В. В. Шомко, Г. А. Барбашова, Л. А. Каменская

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: [dpte@ipt.com.ua](mailto:dpte@ipt.com.ua)*

Методом численного эксперимента определены условия реализации пульсационных импульсов давления в плазменном канале и окружающей его жидкости комбинированными электроразрядными системами. Показано, что на базе фиксированного основного энергоисточника можно создать ряд комбинированных энергоисточников, обеспечивающих генерацию однотипных двухпульсационных импульсов давления.

*Ключевые слова:* численный эксперимент, пульсационные импульсы давления, плазменный канал, энергоисточник.

УДК 532:537, 528:62

## ВВЕДЕНИЕ

Один из способов преобразования электрической энергии в механическую [1, 2] – это электрический разряд в воде, который широко используется во многих отраслях промышленности. При проектировании технологий, основанных на электрическом разряде в воде, методом [3] или каким-либо другим стремятся к тому, чтобы характеристики разряда (такие, например, как разрядный ток и напряжение на канале разряда), задающие закон ввода электрической энергии в канал и, следовательно, давление в нем и в окружающей его жидкости, в частности гидродинамическую нагрузку на обрабатываемый объект, были регулируемы в процессе работы. Поэтому проблема получения управляемых электрических разрядов в воде является актуальной.

Один из приёмов получения управляемых разрядов представляет собой изменение параметров генератора импульсных токов (ГИТ) и длины межэлектродного промежутка. Однако в этом случае выбор параметров осуществляется до начала ввода энергии, поэтому разряд не контролируется во время процесса. Форма вводимой в канал электрической мощности близка к треугольной, а распространяющиеся в рабочей среде волны сжатия чаще всего имеют крутой фронт и спад, близкий к экспоненциальному. Такая форма волны сжатия не удовлетворяет потребностям многих разрядно-импульсных технологий: требуется, например, волна с несколькими максимумами на эпюре давление-время, причём их величины и моменты достижения должны быть различными для каждого конкретного случая. Для получения таких волн в жидкости используются, в частности, многоконтурные ГИТ и параметрическое изменение элементов разрядной

цепи (например, сопротивления и индуктивности) в процессе ввода энергии [3].

В работах [4–6] методом численного эксперимента было показано, что для реализации пульсирующей формы давления жидкости на обрабатываемый объект при многоимпульсном вводе энергии в плазменный канал электрического разряда в жидкости необходимо во втором импульсе электрической мощности в течение времени, примерно равном длительности первого импульса, ввести такое же, как и в первом, или большее количество энергии. При этом для получения функции давления в канале и в жидкости с двумя пульсациями равновеликих амплитуд необходимо ввести во втором импульсе мощности в 3–5 раз (в зависимости от величины крутизны нарастания второго импульса мощности  $\dot{N}_{2+}$ ) большую энергию, чем та, что была введена ранее. Смещение второй пульсации давления вправо по времени относительно первой обеспечивается за счет увеличения как продолжительности второго импульса мощности  $\Delta t_2$ , так и вводимой энергии  $W_2$ , но в первом случае для реализации ситуации получения равных амплитуд необходимо во столько же раз увеличить и  $W_2$ . Эта энергия, как и пороговая энергия формирования второй пульсации давления, может быть уменьшена без изменения распределения давления за счет повышения  $\dot{N}_{2+}$  [5, 6], точнее – повышения отношения  $\dot{N}_{2+} / \dot{N}_{1+}$  ( $\dot{N}_{1+}$  – крутизна нарастания первого импульса мощности).

В приведенных работах начало ввода второго импульса мощности совпадало с окончанием ввода первого. Но практика часто требует повторного ввода электрической энергии в канал разряда в произвольное время, а не только в мо-

мент окончания первой пульсации мощности [7]. Цель настоящей работы – выяснение особенностей гидродинамических процессов в таких ситуациях при помощи численного эксперимента.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Полагаем, что разрядный канал в начальный момент имеет форму прямого кругового цилиндра конечной длины, заполнен идеальной низкотемпературной плазмой и находится в неограниченном объеме идеальной сжимаемой жидкости. В соответствии с принятыми допущениями математическая модель исследуемого процесса включает в себя – систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики [8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial(r \cdot \rho)}{\partial t} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_r)}{\partial t} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z \cdot v_r)}{\partial z} + \frac{\partial[r \cdot (\rho \cdot v_r^2 + p)]}{\partial r} = p, \\ \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z)}{\partial t} + \frac{\partial[r \cdot (\rho \cdot v_z^2 + p)]}{\partial z} + \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot v_z \cdot v_r)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial(r \cdot e)}{\partial t} + \frac{\partial[r \cdot (e + p) \cdot v_z]}{\partial z} + \frac{\partial[r \cdot (e + p) \cdot v_r]}{\partial r} = 0, \end{cases}$$

– двучленное уравнение состояния [8]:

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

где  $t$  – время;  $r, z$  – цилиндрические координаты;  $v_r, v_z$  – радиальная и осевая компоненты вектора скорости жидкости;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность воды;  $e = \rho[\varepsilon + (v_r^2 + v_z^2)/2]$ ;  $\varepsilon$  – удельная внутренняя энергия;  $\rho_0$  – плотность покоящейся жидкости;  $c_0$  – скорость звука в покоящейся жидкости;  $k = 7,15$ ;

– условие баланса энергии в канале разряда, в том числе и на его стенке – контактном разрыве плазма-вода (внутренняя граница расчётной области) [5]:

$$\frac{1}{(\gamma - 1)} \cdot \frac{d(p_a V_a)}{dt} + p_a \cdot \frac{dV_a}{dt} = N(t),$$

где  $p_a$  – давление в канале разряда;  $V_a$  – объём канала разряда;  $\gamma = 1,26$  – эффективный показатель адиабаты плазмы;  $N(t)$  – закон выделения электрической энергии в канале разряда;

– условия динамической совместности на внешней границе расчётной области – ударной волне [8]:

$$\begin{cases} [\rho]D - [\rho v_n] = 0; \\ [\rho v_n]D - [\rho v_n^2 + p] = 0; \\ [\rho(\varepsilon + v_n^2/2)]D - [\rho v(\varepsilon + v_n^2/2) + p v_n] = 0, \end{cases}$$

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

Начальные значения гидродинамических характеристик равны своим значениям в невозмущенной среде при нормальных условиях.

Задача решается конечно-разностным методом Годунова [8].

Выбор режимов ввода энергии в плазменный канал для доопределения граничного условия на контактной поверхности плазма-жидкость осуществляется с учётом уже полученных условий формирования пульсирующих давлений для непрерывных модельных функций мощности [4, 5]. При этом для привязки к условиям [4, 5] полагалось, что время паузы мощности  $t_{\text{П}}$  между первым и вторым ее импульсами включается в характерное время ввода энергии второй пульсации мощности  $\Delta\tau_{2x} = \Delta\tau_2 + t_{\text{П}}$ . Рассматривая два варианта режимов разряда с различающимися значениями времен пауз мощности ( $t_{\text{П1}} = 4,75$  мкс и  $t_{\text{П1}} = 18,75$  мкс) при фиксированной длительности второго импульса мощности в 10 мкс, получаем два значения характерного времени повторного ввода энергии –  $\Delta\tau_{2x}^{(1)} = 14,75$  мкс и  $\Delta\tau_{2x}^{(2)} = 28,75$  мкс. Эти значения времени превышают длительность первого импульса мощности  $\tau_1$  в  $k_{\tau}^{(1)} = 1,31$  и  $k_{\tau}^{(2)} = 2,56$  раза соответственно ( $k_{\tau}^{(1;2)} = \Delta\tau_{2x}^{(1;2)} / \tau_1$ ). Поэтому, чтобы сформировать пульсирующую конфигурацию давления в канале с равновеликими амплитудами, необходимо в соответствии с принятой выше на основании данных [4, 5] гипотезой увеличить величину повторно вводимой энергии относительно уже введенной  $W_1$  в  $(3-5) \cdot k_{\tau}$  раз. Заметим, что если пульсации давления в канале будут иметь равновеликие амплитуды, то для давления в жидкости это будет заведомо достаточным условием реализации такой же ситуации (см. [4, 5]). Поэтому в дальнейшем мы будем акцентировать внимание только на функции давления в канале. С учетом сделанных оценок сформируем два варианта следующих модельных режимов разряда:

$$N(\bar{t}) = N_0 \begin{cases} 0 & \text{при } \bar{t} < 0; \\ 0,281\bar{t} & \text{при } 0 \leq \bar{t} \leq 0,52; \\ 0,241(1,125 - \bar{t}) & \text{при } 0,52 < \bar{t} \leq 1,125; \\ 0 & \text{при } 1,125 \leq \bar{t} \leq 1,60; \\ 0,618(\bar{t} - 1,6) & \text{при } 1,60 < \bar{t} \leq 2,085; \\ 0,582(2,6 - \bar{t}) & \text{при } 2,085 < \bar{t} \leq 2,6; \\ 0 & \text{при } 2,6 < \bar{t}; \end{cases} \quad (1)$$

$$N(\bar{t}) = N_0 \begin{cases} 0 & \text{при } \bar{t} < 0; \\ 0,281\bar{t} & \text{при } 0 \leq \bar{t} \leq 0,52; \\ 0,241(1,125 - \bar{t}) & \text{при } 0,52 < \bar{t} \leq 1,125; \\ 0 & \text{при } 1,125 \leq \bar{t} \leq 1,60; \\ 0,928(\bar{t} - 1,6) & \text{при } 1,60 < \bar{t} \leq 2,085; \\ 0,874(2,6 - \bar{t}) & \text{при } 2,085 < \bar{t} \leq 2,6; \\ 0 & \text{при } 2,6 < \bar{t}; \end{cases} \quad (2)$$

$$N(\bar{t}) = N_0 \begin{cases} 0 & \text{при } \bar{t} < 0; \\ 0,281\bar{t} & \text{при } 0 \leq \bar{t} \leq 0,52; \\ 0,241(1,125 - \bar{t}) & \text{при } 0,52 < \bar{t} \leq 1,125; \\ 0 & \text{при } 1,125 \leq \bar{t} \leq 1,60; \\ 1,236(\bar{t} - 1,6) & \text{при } 1,60 < \bar{t} \leq 2,085; \\ 1,164(2,6 - \bar{t}) & \text{при } 2,085 < \bar{t} \leq 2,6; \\ 0 & \text{при } 2,6 < \bar{t}; \end{cases} \quad (3)$$

$$N(\bar{t}) = N_0 \begin{cases} 0 & \text{при } \bar{t} < 0; \\ 0,281\bar{t} & \text{при } 0 \leq \bar{t} \leq 0,52; \\ 0,241(1,125 - \bar{t}) & \text{при } 0,52 < \bar{t} \leq 1,125; \\ 0 & \text{при } 1,125 \leq \bar{t} \leq 1,60; \\ 1,300(\bar{t} - 1,6) & \text{при } 1,60 < \bar{t} \leq 2,085; \\ 1,224(2,6 - \bar{t}) & \text{при } 2,085 < \bar{t} \leq 2,6; \\ 0 & \text{при } 2,6 < \bar{t}; \end{cases} \quad (3a)$$

$$N(\bar{t}) = N_0 \begin{cases} 0 & \text{при } \bar{t} < 0; \\ 0,281\bar{t} & \text{при } 0 \leq \bar{t} \leq 0,52; \\ 0,241(1,125 - \bar{t}) & \text{при } 0,52 < \bar{t} \leq 1,125; \\ 0 & \text{при } 1,125 \leq \bar{t} \leq 1,60; \\ 1,856(\bar{t} - 1,6) & \text{при } 1,60 < \bar{t} \leq 2,085; \\ 1,748(2,6 - \bar{t}) & \text{при } 2,085 < \bar{t} \leq 2,6; \\ 0 & \text{при } 2,6 < \bar{t}; \end{cases} \quad (4)$$

$$N(\bar{t}) = N_0 \begin{cases} 0 & \text{при } \bar{t} < 0; \\ 0,281\bar{t} & \text{при } 0 \leq \bar{t} \leq 0,52; \\ 0,241(1,125 - \bar{t}) & \text{при } 0,52 < \bar{t} \leq 1,125; \\ 0 & \text{при } 1,125 \leq \bar{t} \leq 3,0; \\ 1,949(\bar{t} - 3,0) & \text{при } 3,0 < \bar{t} \leq 3,485; \\ 1,835(4,0 - \bar{t}) & \text{при } 3,485 < \bar{t} \leq 4,0; \\ 0 & \text{при } 4,0 < \bar{t}; \end{cases} \quad (5)$$

$$N(\bar{t}) = N_0 \begin{cases} 0 & \text{при } \bar{t} < 0; \\ 0,281\bar{t} & \text{при } 0 \leq \bar{t} \leq 0,52; \\ 0,241(1,125 - \bar{t}) & \text{при } 0,52 < \bar{t} \leq 1,125; \\ 0 & \text{при } 1,125 \leq \bar{t} \leq 3,0; \\ 2,596(\bar{t} - 3,0) & \text{при } 3,0 < \bar{t} \leq 3,485; \\ 2,444(4,0 - \bar{t}) & \text{при } 3,485 < \bar{t} \leq 4,0; \\ 0 & \text{при } 4,0 < \bar{t}; \end{cases} \quad (6)$$

$$N(\bar{t}) = N_0 \begin{cases} 0 & \text{при } \bar{t} < 0; \\ 0,281\bar{t} & \text{при } 0 \leq \bar{t} \leq 0,52; \\ 0,241(1,125 - \bar{t}) & \text{при } 0,52 < \bar{t} \leq 1,125; \\ 0 & \text{при } 1,125 \leq \bar{t} \leq 3,0; \\ 3,898(\bar{t} - 3,0) & \text{при } 3,0 < \bar{t} \leq 3,485; \\ 3,671(4,0 - \bar{t}) & \text{при } 3,485 < \bar{t} \leq 4,0; \\ 0 & \text{при } 4,0 < \bar{t}. \end{cases} \quad (7)$$

Они различаются величинами пауз мощности, составляющих 4,75 мкс для режимов (1)–(4) –

первый вариант и 18,75 мкс для режимов (5)–(7) – второй вариант. Здесь, как и в [4, 5],  $N_0 = 2,5$  ГВт – характерная мощность разряда,  $\bar{t} = t/\tau_0$  – безразмерное время,  $\tau_0 = 10$  мкс – характерное время разряда; начальная длина канала принималась равной 0,06 м. Подбор режимов для каждого из вариантов осуществлялся таким образом, чтобы достигалась необходимая для формирования равновеликих амплитуд давления повторно вводимая энергия. Графическое представление энергетических характеристик модельных режимов (1)–(7) приведено на рис. 1. Первый импульс мощности для всех режимов оставался неизменным, поскольку эта часть электрической энергии расходуется на формирование лишь первой пульсации давления.

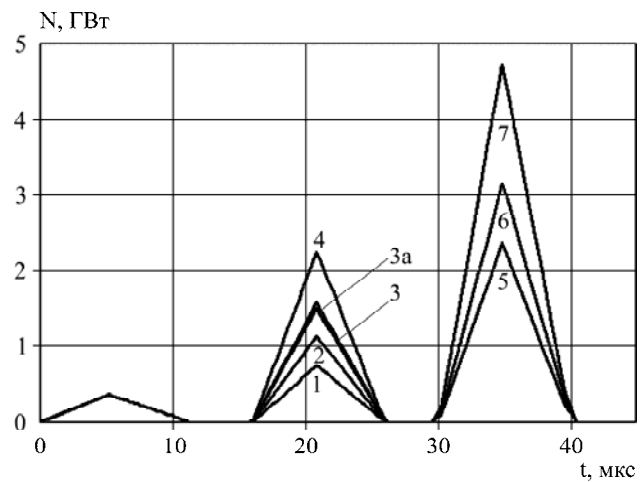


Рис. 1. Модельные зависимости мощности от времени и режима ввода энергии (маркировка кривых на рис. 1–4 соответствует номерам модельных представлений мощности (1)–(7)).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Аналізу подвергались результаты численного расчета гидродинамических (временная функция давления в разрядном канале  $p_a(t)$ ) и энергетических (временные функции объёмных плотностей мощности  $n_v(t) = N(t)/V(t)$  и вводимой в разрядный канал энергии  $\varepsilon_v(t) = \int_0^t N(t) dt / V(t)$ ) характеристик канала, где  $V(t)$  – текущее значение объёма разрядного канала. Соответствующие расчетные функции представлены на рис. 2–4.

Из сопоставления характера изменения функций  $p_a(t)$ ,  $n_v(t)$  и  $\varepsilon_v(t)$  со временем следует, что давление в канале и вводимая в него объёмная плотность электрической энергии качественно подобны как по форме кривых, так и по степени их зависимости от режима энерговыделения (величины вводимой энергии  $W_2$ , времени паузы мощности и скорости нарастания мощности). Причем в отличие от корреляций амплитуд давления в канале  $p_{am}$  и плотностей мощности  $n_{vm}$

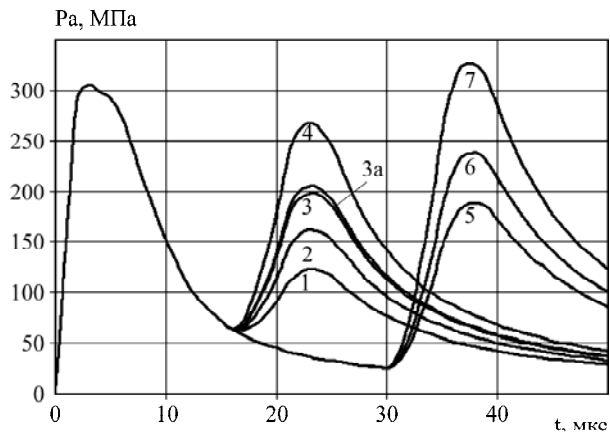


Рис. 2. Эпюры давления в канале разряда.

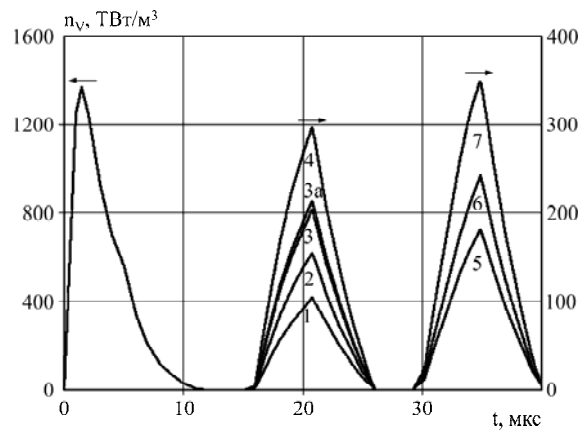


Рис. 3. Зависимости введенной в разрядный канал удельной объемной электрической мощности от времени и режима разряда.

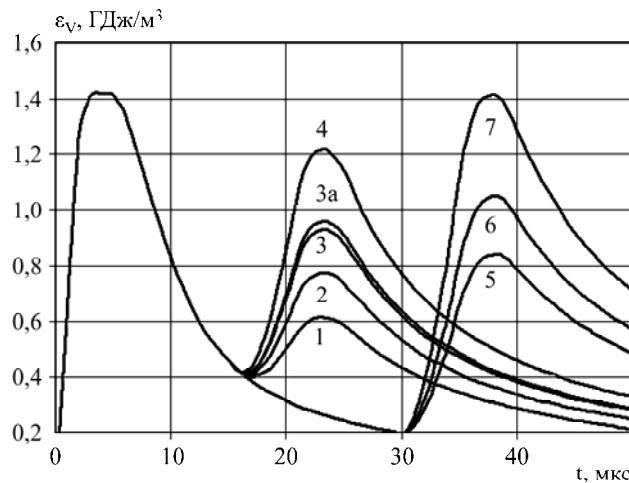


Рис. 4. Зависимости введенной в разрядный канал удельной объемной энергии от времени и режима разряда.

амплитуды давления в канале коррелируют с амплитудами плотности энергии  $\varepsilon_{vm}$  для обеих пульсаций давления и плотности энергии. Между ними наблюдается квазилинейная зависимость, которая с относительной погрешностью  $\delta < 4\%$  аппроксимируется линейной зависимостью вида

$$p_{am} = 238,5(\varepsilon_{vm} - 0,086), \quad (8)$$

где  $p_{am}$  измеряется в МПа, а  $\varepsilon_{vm}$  – в ГДж/м<sup>3</sup>.

Подобная аппроксимация (но только для амплитуд повторных пульсаций) может быть получена и для функции  $p_{am2}(n_{vm2})$ :

$$p_{am2} = 0,887(n_{vm2} + 40), \quad (9)$$

где  $p_{am2}$  – амплитуда второй пульсации давления в канале разряда, измеряется в МПа, а  $n_{vm2}$  – величина второго максимума плотности мощности в канале разряда – в ТВт/м<sup>3</sup>.

Относительная погрешность расчета давления по формуле (9) не превышает 5%. При анализе результатов численного эксперимента по зависимости давления в разрядном канале от плотностей мощности и вводимой в канал энергии (см. рис. 2–4 и формулы (8), (9)) не было обнаружено сколь-нибудь заметного влияния на эти взаимо-

связи времени паузы мощности. По-видимому, если такое влияние и имеет место, то оно весьма слабое и неявно учтено в осредненных коэффициентах выражений (8) и (9). Для прояснения этой ситуации были привлечены аналогичные результаты численных экспериментов для модельных режимов разряда без паузы мощности [3]. Амплитудные значения интересующих нас величин приведены в табл. 1. Анализ этих данных показывает, что полученные для режимов с паузой мощности формулы (8) и (9) удовлетворительно (с относительной погрешностью  $\delta_{pe}$  менее 8% по  $\varepsilon_{vm}$  и  $\delta_{pn}$  менее 14% по  $n_{vm2}$ ) описывают и расчётные данные для беспаузных режимов. Поэтому в границах указанных погрешностей влияние продолжительности паузы мощности на взаимосвязи между энергетическими функциями  $\varepsilon_v(t)$ ,  $n_v(t)$  и давлением  $p_a(t)$  можно не учитывать.

В то же время сопоставительный анализ приведенных на рис. 1 и 2 результатов показывает, что время формирования пика второй пульсации давления в канале зависит, при фиксированной длительности довыделяемой энергии, в основном от паузы мощности. Временной промежуток между пиками пульсаций давления в 1,2–1,3 раза

**Таблица 1.** Сравнение рассчитанных по формулам (8) и (9) значений  $p_{ам}$  с данными, полученными по результатам численного эксперимента [3]

№ варианта [5]	Исходные данные			Расчет по формулам		$\delta_{pm}, \%$	$\delta_{pe}, \%$
	$p_{ам}, \text{МПа}$	$n_{vm}, \text{ТВт/м}^3$	$\varepsilon_{vm}, \text{ГДж/м}^3$	(8)	(9)		
2	106	68,6	0,567	115	96	9	8
3д	111	68,6	0,588	120	96	13	8
3ж	112	68,6	0,590	120	96	14	7
2б	206	210	0,986	215	222	8	4
3е	228	210	1,09	239	222	3	5
3з	231	210	1,10	242	222	4	5
1-я пульсация	306	1250	1,42	318	–	–	4

**Таблица 2.** Параметры пульсационной активности разрядов с паузой (№ 5–7, 10–12, 16, 17) и без паузы мощности при  $W_1 = 2055 \text{ Дж}$ ,  $\tau_1 = 11,25 \text{ мкс}$ ,  $p_{ам1} = 305 \text{ МПа}$  и  $\varepsilon_{vm1} = 1,42 \text{ ГДж/м}^3$  ( $p_{ам1}$  – амплитуда первой пульсации давления в канале разряда,  $\varepsilon_{vm1}$  – величина первого максимума плотности энергии в канале разряда)

№ п/п	№ режима (источник)	$\varepsilon_{vm2}, \text{ГДж/м}^3$	$p_{ам2}, \text{МПа}$	$\Delta\tau_2, \text{мкс}$	$W_2, \text{Дж}$	$k_\tau$	$k_W$	$k_*$
1	2 [5]	0,58	98	10	1752	0,89	0,85	0,96
2	3а [4]	0,58	96	50	5624	4,4	2,74	0,62
3	3д [5]	0,59	103	50	8760	4,4	4,26	0,96
4	3ж [5]	0,59	104	80	14016	7,1	6,80	0,96
5	1 [НС]	0,61	123	14,75	3745	1,31	1,82	1,39
6	5 [НС]	0,73	189	28,75	11815	2,56	5,75	2,25
7	2 [НС]	0,78	162	14,75	5625	1,31	2,74	2,06
8	2а [4]	0,78	150	10	3747	0,89	1,82	2,04
9	3б [4]	0,87	184	50	30754	4,4	15,0	3,37
10	6 [НС]	0,91	238	28,75	15740	2,56	7,66	2,99
11	3 [НС]	0,93	199	14,75	7495	1,31	3,65	2,78
12	3а [НС]	0,96	206	14,75	7880	1,31	3,83	2,93
13	2б [4]	0,99	192	10	5626	0,89	2,74	3,08
14	3е [5]	1,09	213	50	28130	4,4	13,74	3,08
15	3з [5]	1,10	215	80	45008	7,1	21,90	3,08
16	7 [НС]	1,24	328	28,75	23630	2,56	11,15	4,36
17	4 [НС]	1,25	268	14,75	11250	1,31	5,47	4,18

превосходит соответствующий временной промежуток между пиками мощности и имеет тенденцию к уменьшению по мере роста времени паузы мощности. Заметим, что для режимов разряда комбинированного энергоисточника без паузы мощности (см. [4, 5]) такое превышение достигает 1,6 раза, а время формирования второго пика давления определяется продолжительностью довыделения энергии. Поэтому вполне оправданным является включение при постановке задачи для режимов с паузой мощности в характерное время выделения энергии дополнительного источника времени паузы мощности.

Представленные выше результаты (см. рис. 1–4 и формулу (8)) показывают, что для получения двухпульсационной конфигурации давления с примерно равновеликими амплитудами пульсаций необходимо реализовать в соответствии с режимом 7 второго варианта (см. рис. 2, 4) или формулой (8) величину объемной плотности дополнительно вводимой энергии такой же амплитуды, как и от основного энерго-

источника. Но величину амплитуды  $\varepsilon_{vm}$ , зависящую как от закона ввода энергии, так и объема плазменного разрядного канала, который в свою очередь зависит от вводимой энергии, предсказать заранее невозможно. Поэтому, оперируя первоначально параметрами вводимой энергии ( $W_1$  и  $W_2$ ) и временами ее ввода ( $\tau_1$  и  $\Delta\tau_2$ ), целесообразно было бы найти между ними и амплитудой  $\varepsilon_{vm}$  взаимосвязку. Для этой цели сведем интересующие нас параметры  $p_{ам}$ ,  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $k_\tau$ ,  $\Delta\tau_2$ ,  $k_W = W_2/W_1$ ,  $k_* = k_W/k_\tau$  и  $\varepsilon_{vm2}$  ( $\varepsilon_{vm2}$  – величина второго максимума плотности энергии в канале разряда) по режимам 1–7 настоящей статьи (НС) и режимам работ [4, 5] в единую табл. 2.

Сравнивая между собой режимы с примерно равными плотностями энергии (они в таблице расположены компактно в порядке возрастания  $\varepsilon_{vm2}$ ), легко убедиться, что синхронно с ростом амплитуды  $\varepsilon_{vm2}$  возрастает и число  $k_*$ . Причем примерно одинаковым значениям  $\varepsilon_{vm2}$  и  $p_{ам2}$  соответствуют и примерно одинаковые значения числа  $k_*$ . Следовательно, существует прибли-

женный энергетический критерий  $k_*$ , по которому можно построить электроразрядный энергоисточник, способный генерировать пульсирующие импульсы давления в плазменном канале и окружающей его жидкости с равновеликими амплитудами повторных пульсаций. Получить пульсирующие конфигурации давления с двумя первыми равновеликими амплитудами пульсаций можно (см. рис. 2 и табл. 2, режим 7) на базе комбинированного электроразрядного источника с энергетическим числом  $k_* \geq 4,4$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты численного эксперимента свидетельствуют, что на базе комбинированных электроразрядных энергоисточников, например многоконтурных ГИТ, можно формировать импульсы давления с несколькими последовательными пульсациями, число которых равно числу пульсаций электрической мощности. Для формирования второй пульсации давления с примерно равной первой пульсации амплитудой необходимо реализовать объемную плотность дополнительно вводимой энергии такой же амплитуды, как от основного энергоисточника.

На базе фиксированного основного энергоисточника можно сформировать ряд комбинированных энергоисточников, обеспечивающих генерацию однотипных двухпульсационных импульсов давления, в том числе и с равновеликими амплитудами. Для этого необходимо обеспечить равенство отношений превышений величин повторно выделяемой энергии и длительности ее выделения над соответствующими параметрами первого импульса мощности; причем для получения равновеликих амплитуд давления требуется увеличение амплитуды второй пульсации мощности относительно первой, по крайней мере (в зависимости от паузы мощности) на порядок. Временной интервал между пульсациями давления каждого из режимов с паузой мощности примерно в 1,25 раза, а без паузы – в 1,46 раза больше временного интервала между пиками их мощности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Болога М.К., Гросу Ф.П. Физические аспекты электрогидродинамических явлений. *ЭОМ*. 2006, **42**(3), 118–127.
2. Grosu F.P., Bologna M.K. Thermoelectrohydrodynamic Methods of Energy Conversion. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2010, **46**(6), 582–588.
3. Barbashova G.A. Restoration of the Characteristics of the Cavity Formed upon Explosion of a Microconductor According to the Specified Two Pulse Temperature Dependence of the Pressure at a Point in a Liquid. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2010, **46**(1), 53–56.
4. Барбашова Г.А., Вовченко А.И., Каменская Л.А., Шомко В.В. Управление гидродинамическими процессами при электровзрывном программируемом многоимпульсном вводе энергии. *Акустичний вісник*. 2004, **7**(4), 3–9.
5. Барбашова Г.А., Вовченко А.И., Каменская Л.А., Шомко В.В. Гидродинамические параметры электрических разрядов в жидкости при двухимпульсном вводе энергии. *ЭОМ*. 2006, **42**(2), 23–29.
6. Барбашова Г.А., Шомко В.В. Влияние цикличности ввода электрической энергии в канал подводного искрового разряда на гидродинамику процесса. *ЭОМ*. 2007, **43**(2), 43–49.
7. Вовченко А.И. *Высоковольтные электроразрядные системы с управляемым преобразованием энергии*. Автореф. дис. докт. техн. наук. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2002.
8. *Численное решение многомерных задач газовой динамики*. Под ред. С.К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.

Поступила 12.12.12  
После доработки 18.01.13

### Summary

The method of numerical experiment has been applied to specify conditions of pulsation pressure pulses realization in a plasma channel and the surrounding liquid by combined electrodischarge systems. It is shown that on the base of a fixed power source it is possible to establish a series of combined power sources that provide for the generation of one-type two-pulsation pressure pulses.

*Keywords: numerical experiment, pulsation pulses of pressure, plasma channel, power source.*