

УДК 537.528+621.372.011.74

**А.И.Вовченко**, докт.техн.наук, **Н.П.Дивак**, **Р.В.Тертилов** (Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев)

### **ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ВЫБОР СООТВЕТСТВУЮЩИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ НИХ**

*Развит подход по оптимизации электрогидроимпульсных технологий и выбору соответствующих режимов работы высоковольтных емкостных источников энергии на базе решения обратных задач. Предложена математическая модель для синтеза высоковольтных емкостных источников энергии, реализующих конкретные электрогидроимпульсные технологии. Приведены результаты расчётов.*

*Розвинуто підхід щодо оптимізації електрогідроімпульсних технологій та вибору відповідних режимів роботи високовольтних ємнісних джерел енергії на базі рішення обернених задач. Запропоновано математичну модель синтезу високовольтних ємнісних джерел енергії, що реалізують конкретні електрогідроімпульсні технології. Наведено результати розрахунків.*

**Введение.** Основной тенденцией развития электрогидроимпульсных технологий (ЭГИТ) и соответствующих высоковольтных электроразрядных систем (ВЭРС), реализующих ЭГИТ, является выбор режимов работы и параметров ВЭРС, а также оперативное управление ими в зависимости от требования технологического процесса и объекта обработки [4]. Именно в этом случае обеспечиваются низкие удельные энергозатраты, высокая производительность, надежность и т.п. В настоящее время достаточно изучены, частично математически описаны и обобщены физические процессы, происходящие на всех стадиях преобразования энергии в ВЭРС [1–3,5,7–9,14,15], разработаны различные способы целенаправленного управления этими процессами [2,5]. Это позволило создать при определенных приближениях математическую модель, описывающую всю цепочку последовательного преобразования энергии электрического поля.

Фактически решена, с различными степенями приближения, прямая задача: энергоисточник – выходные силовые нагрузки. Теоретически это позволяет путем численного вариационного эксперимента выбрать и соответствующие режимы работы, параметры вновь проектируемых и работающих ВЭРС для реализации оптимального распределения силовых нагрузок в зависимости от требований конкретной ЭГИ технологии и объекта обработки. Практически чрезвычайная многофакторность и, в некоторых случаях, стохастичность явлений приводят к малой вероятности получения положительного результата. Этот подход зачастую используется как прогнозный.

В результате в большинстве случаев разработка ВЭРС, выбор режимов их работы и параметров ведутся на базе прогнозных расчетов и накопленного опыта с последующим уточнением данных на натурном эксперименте.

Принципиально иная ситуация заложена в подходе, когда ставится задача синтеза такого импульсного энергоисточника (или энергоисточников), который бы реализовал в зоне объекта обработки оптимальную по интенсивности и форме гидродинамическую нагрузку  $P(t)$  для конкретной ЭГИТ. Физическая модель такого подхода базируется на выделении из сложной системы простых независимых подсистем, описывающих класс взаимодействующих физических процессов, разных по природе и взаимодействующих между собой по цепочному принципу, когда выходные характеристики одной подсистемы являются входными для последующей [6]. Однако в этой работе методология разработана для стабилизированного микропроводником разряда и не учитывает особенности большинства электрогидроимпульсных технологий обработки материалов, которые используют высоко-

вольтовый пробой жидкостного промежутка. Кроме того, в [6] задача до конца не решена, так как фактически не указаны пути синтеза ВЭРС.

В данной работе развивается подход по выбору режимов работы и синтеза ВЭРС на базе емкостного накопителя исходя из требований конкретных технологий с учетом свойств рабочей жидкости и геометрии электродной системы.

В работе [6] сложная система преобразования энергии разбивалась на три более простые подсистемы – гидродинамическую (ГДПС), электродинамическую (ЭДПС) и электротехническую (ЭТПС), что справедливо для разрядов, стабилизированных микропроводником. Для электрогидроимпульсных технологий, где используется высоковольтный пробой жидкости, всегда характерно наличие предпробивной стадии, то есть процессов, происходящих в разрядном промежутке до его пробоя. Эти процессы – энергозатратные, они определяются многими факторами (свойствами жидкой среды, геометрией электродной системы, напряженностью электрического поля и т.д.) и их необходимо учитывать при определении параметров (синтезе) емкостного энергоисточника. Поэтому в данной работе они выделены в отдельную подсистему – каналоформирующую (КФПС), которая включена в структуру ранее обозначенных подсистем при решении обратной задачи (рис. 1).

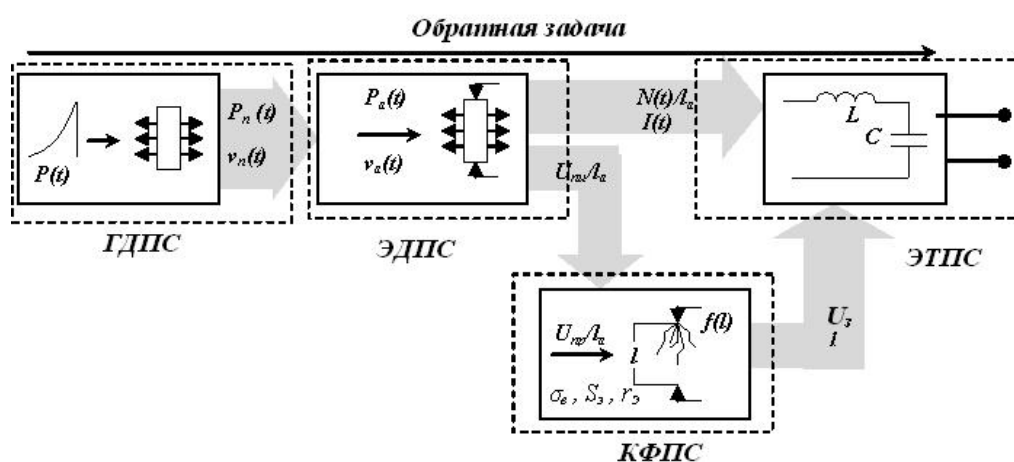


Рис. 1

На этом рисунке использованы следующие обозначения:  $P_n(t)$ ,  $P_a(t)$  – давления в расширяющемся поршне и в канале разряда соответственно;  $v_n(t)$ ,  $v_a(t)$  – скорости расширения поршня и канала разряда соответственно;  $\sigma_e$  – удельная электропроводность воды;  $S_3$  – площадь смачиваемой поверхности положительного электрода;  $r_3$  – радиус закругления стержня положительного электрода;  $U_3$  – напряжение заряда конденсаторной батареи;  $l$  – длина межэлектродного промежутка;  $l_a$  – длина канала разряда;  $f(l)$  – величина предпробивных потерь как функция от длины межэлектродного промежутка;  $I(t)$  – ток в канале разряда;  $N(t)/l_a$  – удельная мощность, выделяющаяся на активном сопротивлении канала разряда;  $U_{np}/l_a$  – удельное напряжение пробоя.

В соответствии с рис. 1 на первом этапе с использованием подхода [6] решается задача, когда по заданной функции давления в точке среды  $P(t)$  на расстоянии  $r$  от оси расширяющегося поршня определяются необходимое давление в поршне  $P_n(t)$  и скорость его расширения  $v_n(t)$ , обеспечивающие заданное  $P(t)$ . Данное решение получено при условии непроницаемости границы расширяющегося поршня с числом Маха, не превосходящим 0,2. На втором этапе моделируется расширяющийся поршень каналом разряда, в котором давление  $P_a(t)$  и скорость его расширения  $v_a(t)$  соответствуют  $P_n(t)$  и  $v_n(t)$ . Решение обратной задачи для ЭДПС направлено на определение необходимых: электрической мощности, выделяемой на активном сопротивлении канала разряда  $N(t)$ , величины протекающего тока  $I(t)$ , активного сопротивления канала разряда  $R_a(t)$  и падения напряжения на нём  $U(t)$ , которые обеспечат  $P_a(t)$  и  $v_a(t)$ . Задача КФПС состоит в определении длины разрядного промежутка и величины зарядного напряжения генератора импульсных токов в зависимости от удельной проводимости рабочей среды, геометрии электродной системы и величины предпробивных потерь. Наконец, по известным  $N(t)$ ,  $I(t)$ ,  $U_3$ ,  $l$  выполняется синтез емкостного генератора импульсных токов (ЭТПС).

Подсистемы взаимодействуют между собой в соответствии со связями, указанными на рис. 1, и описываются соответствующими системами уравнений.

**Алгоритм решения задачи.** Математическая модель ОЭДЗ для высоковольтного электрического разряда в жидкости [6], преобразованная для прямого решения уравнений относительно получаемых из обратной гидродинамической задачи выходных параметров [6] – сечения канала  $S(t)$  и давления  $P_a(t)$  в нем, может быть записана в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{N(t)}{\ell_a} &= \frac{S(t)}{\gamma-1} \cdot \frac{dP_a(t)}{dt} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot P_a(t) \cdot \frac{dS(t)}{dt}, \\ \sigma_a(t) &= [A(\gamma-1)]^{-1} \cdot P_a(t), \\ \frac{R_a(t)}{\ell_a} &= A(\gamma-1) \cdot [P_a(t) \cdot S(t)]^{-1}, \\ I(t) &= (\gamma-1)^{-1} \cdot \left\{ A^{-1} \cdot P_a(t) \cdot S(t) \cdot \left[ S(t) \cdot \frac{dP_a(t)}{dt} + \gamma \cdot P_a(t) \cdot \frac{dS(t)}{dt} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \\ \frac{U(t)}{\ell_a} &= \sqrt{A} \cdot \left\{ \frac{d[\ln(P_a(t))]}{dt} + \gamma \cdot \frac{d[\ln(S(t))]}{dt} \right\}^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\gamma$  – эффективный показатель адиабаты разрядной плазмы;  $A=0,25 \cdot 10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$  – искровая постоянная.

Система уравнений (1) записана при следующих допущениях: вводимая в канал разряда энергия расходуется только на расширение канала и изменение его внутренней энергии [10,16]; существование пропорциональной зависимости между проводимостью и внутренней энергией плазмы единицы длины канала разряда [10]; цилиндрическая симметрия непроницаемого расширяющегося канала разряда с равномерным радиальным распределением его проводимости.

Длина канала  $l_a$  при высоковольтном пробое жидкости, согласно экспериментальным данным [9,10, 15], примерно вдвое превышает длину разрядного промежутка  $l$ , т.е.:

$$l_a \approx 2l. \quad (2)$$

Тогда удельные электродинамические функции, получаемые из решения обратной электродинамической задачи, можно преобразовать к терминам длины разрядного промежутка, увеличив их значения соответственно в два раза. В дальнейшем все электродинамические параметры на единицу длины разрядного промежутка будем записывать с верхним индексом \*.

Напряжение на разрядном промежутке  $l$  в момент его пробоя (пробивное напряжение)  $U_{np}$  может быть определено из выражений амплитудных значений тока и мощности, полученных в работах [10,16]

$$I_{\max} = U_{np} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot (0,92 - 0,65 \cdot \eta^2), \quad (3)$$

$$N_{\max} = U_{np}^2 \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot (1 - 0,85 \cdot \eta) \cdot (\eta^3 \cdot (0,37 + 0,6 \cdot \eta^2))^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где  $\eta$  – критерий подобия электродинамических характеристик разряда, характеризующий режим разряда, при  $\eta=1$  – разряд критический. Тогда из (3) и (4) имеем

$$U_{np} = \frac{N_{\max}}{I_{\max}} \cdot \frac{(0,92 - 0,65 \cdot \eta^2)}{(1 - 0,85 \cdot \eta) \cdot \sqrt{\eta^3 \cdot (0,37 + 0,6 \cdot \eta^2)}} \quad (5)$$

или в удельных величинах

$$U_{np}^* = \frac{N_{\max}^*}{I_{\max}^*} \cdot \frac{(0,92 - 0,65 \cdot \eta^2)}{(1 - 0,85 \cdot \eta) \cdot \sqrt{\eta^3 \cdot (0,37 + 0,6 \cdot \eta^2)}}, \quad (6)$$

где  $N_{\max}^* = N_{\max} / 2l$ . Абсолютное значение пробивного напряжения определится как  $U_{np} = 2 \cdot l U_{np}^*$ .

Для нахождения значения  $U_{np}^*$  из (11) необходимо знать величину  $\eta$ . Чтобы определить ее, воспользуемся семейством нормированных кривых тока, приведенных в [10], из которого построена

зависимость критерия  $\eta$  от отношения времен максимума тока  $\tau_m$  и длительности его первой полу- волны  $\tau_1$  (рис. 2, сплошная линия). Для получения функциональной зависимости данная кривая при помощи программы «Advanced Grapher 1.61» была аппроксимирована степенным полиномом восьмого порядка:

$$\eta = \sum_{k=0}^n A_k \cdot (\tau_m / \tau_1)^{n-k}, \quad (7)$$

где  $n=8$  со следующими коэффициентами:  $A_k = \{-2,6270759 \cdot 10^6; 5,7296242 \cdot 10^6; -1,9246031 \cdot 10^6; -5,0664742 \cdot 10^6; 6,1038601 \cdot 10^6; -2,6447811 \cdot 10^6; 336956,2843562; 76384,4564086; -19426,3114159\}$ .

Это позволило по любой заданной временной зависимости тока определять критерий  $\eta$ . Аппроксимированная кривая показана на рис. 2 пунктирной линией. Как видно из рисунка, аппроксимация с достаточной степенью точности отображает исходную кривую.

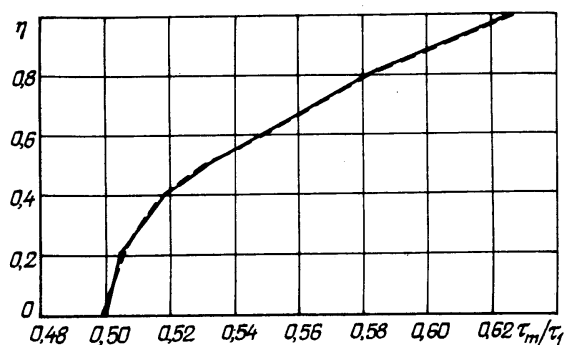


Рис. 2

Затрачиваемая на формирование канала разряда энергия  $W_n$  (предпробивные потери), описываемая в КПФС, может быть представлена как часть от запасенной энергии  $W_3 = C \cdot U_3^2 / 2$  в емкостном накопителе энергии

$$W_n = f \cdot C \cdot U_3^2 / 2, \quad (8)$$

где  $f$  – доля энергии от запасенной, затрачиваемой на формирование канала разряда (коэффициент предпробивных потерь);  $C$  – величина ёмкости конденсаторной батареи, Ф;  $U_3$  – зарядное напряжение емкостного накопителя, В.

С другой стороны, энергия потерь может быть найдена из соотношения, полученного И.П.Ку- жекиным [13], которое учитывает удельную электропроводность воды  $\sigma_6$ , площадь смачиваемой по- верхности положительного электрода  $S_3$ , длину промежутка  $l$ , зарядное напряжение емкостного накопителя  $U_3$

$$W_n = \frac{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot S_3} \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma_6 \cdot U_3^2 \cdot (1 + k \cdot l)}{(U_3 - U_0)}, \quad (9)$$

где  $\alpha = 0,36 \cdot 10^6$  В<sup>2</sup>·с/м;  $k=40$  м<sup>-1</sup> – постоянные;  $U_0$  – минимальное пороговое напряжение перехода теплового пробоя в лидерный

$$U_0 = 1,82 \cdot 10^6 \cdot r_3 \cdot \ln(4 \cdot l / r_3). \quad (10)$$

Выражение (9) применимо для разрядов, сформированных при параметрах генератора, гео- метрии электродной системы и проводимости воды, значения которых находятся в пределах:

- величина ёмкости накопителя энергии  $C=1 \dots 10$  мкФ;
- зарядное напряжение емкостного накопителя  $U_3=10 \dots 100$  кВ;
- значение длины оголенной части электрода  $l_3=5 \dots 70$  мм;
- длина межэлектродного промежутка  $l=10 \dots 300$  мм;
- радиус закругления стержня положительного электрода  $r_3=1 \dots 5$  мм;
- значение электропроводности воды  $\sigma_6=0,01 \dots 0,04$  См/м.

Из (8) и (9) получаем зависимость для определения зарядного напряжения конденсаторной батареи

$$U_3 = \frac{4 \sqrt{\pi S_3} \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma_6 (1 + kl)}{fC} + U_0. \quad (11)$$

Тогда напряжение на зарядном промежутке в момент его пробоя

$$U_3 = \sqrt{1-f} \frac{4\sqrt{\pi S_3} \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma_6 (1+kl)}{fC} + U_o. \quad (12)$$

В соответствии с выражением (12) можно для полученного из решения обратной задачи  $U_{np}^*$  выбранной электродной системы, принятой проводимости воды и конкретного значения предпробивных потерь рассчитать длину разрядного промежутка.

Таким образом, совокупность выражений (2), (8)–(12) можно рассматривать как математическую модель КФПС.

Входными параметрами для ЭТПС будут электродинамические характеристики канала разряда, полученные из ЭДПС, и величина разрядного промежутка, полученная из КФПС.

Величину емкости накопителя энергии найдем из взаимосвязи между выделившейся в канале разряда за время первого полупериода тока энергией  $W_1$  и энергией, запасенной в накопителе в момент пробоя  $W_o$ , т.е.  $W_1 = \eta W_o$ . С учетом (6) получаем “удельную” емкость

$$\left. \begin{aligned} W_o &= \frac{C \cdot (U_{np})^2}{2} \\ W_1 &= \int_0^{\tau_1} N(t) \cdot dt \end{aligned} \right\} \rightarrow \left. \begin{aligned} \frac{W_o}{l_a} &= \frac{C \cdot l_a}{2} \cdot \left( \frac{U_{np}}{l_a} \right)^2 \\ \frac{W_1}{l} &= \int_0^{\tau_1} \frac{N(t)}{l_a} \cdot dt \end{aligned} \right\} \rightarrow \left. \begin{aligned} W_o^* &= \frac{C^* \cdot (U_{np}^*)^2}{2} \\ W_1^* &= \int_0^{\tau_1} N^*(t) \cdot dt \end{aligned} \right\} \Rightarrow C^* = \frac{2}{\eta} \cdot \frac{\int_0^{\tau_1} N^*(t) \cdot dt}{(U_{np}^*)^2} \quad (13)$$

и абсолютную величину емкости накопителя

$$C = C^* / l_a = \frac{2}{l_a \cdot \eta} \cdot \frac{\int_0^{\tau_1} N^*(t) \cdot dt}{(U_{np}^*)^2}. \quad (14)$$

Величина индуктивности  $RLC$  разрядного контура с нелинейным активным сопротивлением канала разряда  $R_a$  определяется из соотношения для длительности первого полупериода тока  $\tau_1$  [10]

$$\frac{\tau_1}{\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = 1 + \eta^3. \quad (15)$$

С учетом (14) имеем

$$L = \left( \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{C}} \cdot \frac{\tau_1}{1 + \eta^3} \right)^2 = \left( \frac{\tau_1}{\pi \cdot (1 + \eta^3)} \right)^2 \cdot \frac{l \cdot \eta \cdot (U_{np}^*)^2}{2 \cdot \int_0^{\tau_1} N^*(t) \cdot dt}. \quad (16)$$

Совокупность выражений (11), (14) и (16) является математической моделью синтеза для ЭТПС и позволяет при заданных потерях находить значения  $C$ ,  $L$ ,  $U_3$  импульсного энергоисточника.

**Пример расчёта.** Используя предложенный выше алгоритм и математические модели, выполним синтез параметров энергоисточника по заданной временной зависимости гидродинамического давления  $P(t)$  (рис. 3) на расстоянии  $r=0,09$  м от источника возмущения (канала разряда) для различных предпробивных потерь на стадии формирования канала. Для расчёта взяты параметры одной из реальных электродных систем, используемых в установках по электрогидравлической обработке материалов: значение длины оголенной части электрода  $l_3 = 0,05$  м, Радиус закругления стержня положительного электрода  $r_3 = 0,0045$  м, площадь смачиваемой поверхности положительного электрода  $S_3 = 0,00141$  м<sup>2</sup> и удельная электропроводность воды  $\sigma_6 = 0,02$  (Ом·м)<sup>-1</sup>.

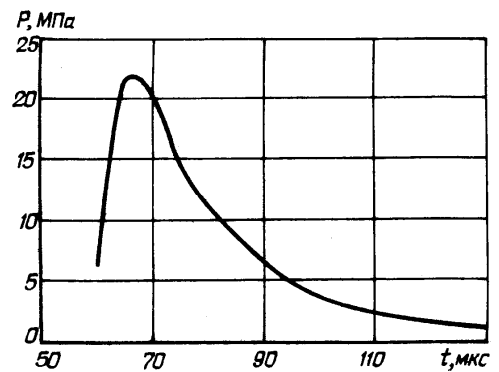


Рис. 3

По заданной функции гидродинамического давления найдены зависимости давления в канале разряда  $P_a(t)$  и  $v_a(t)$  (из решения ГДПС [11]), показанные на рис. 4, а и 4, б.

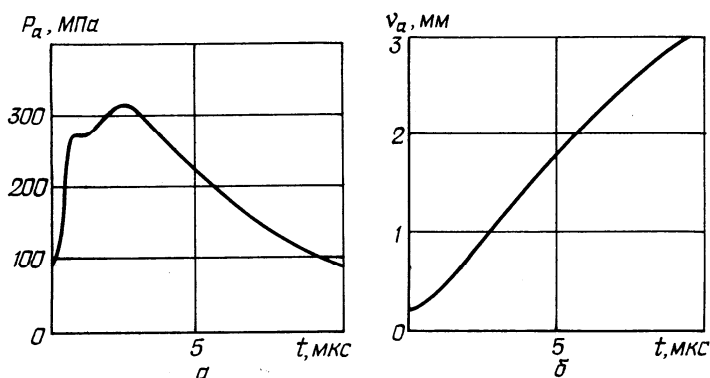


Рис. 4

Как следует из приведенных данных, возможно при различных значениях предпробивных потерь и длинах разрядного промежутка путём выбора необходимых параметров энергоисточника обеспечить необходимую мощность  $N^*(t)$  и ток  $I(t)$  в канале разряда, которые, в свою очередь, позволят реализовать давление в канале разряда  $P_a(t)$ , скорость его расширения  $v_a(t)$  и необходимую (заданную) по интенсивности и форме гидродинамическую нагрузку  $P(t)$ , т.е. оптимизировать технологический процесс в целом. Достоверность расчётных данных подтверждается удовлетворительным для инженерных расчётов совпадением удельных энергий, выделяемых в разрядном канале на единицу его длины (таблица), и из решения обратной электродинамической задачи

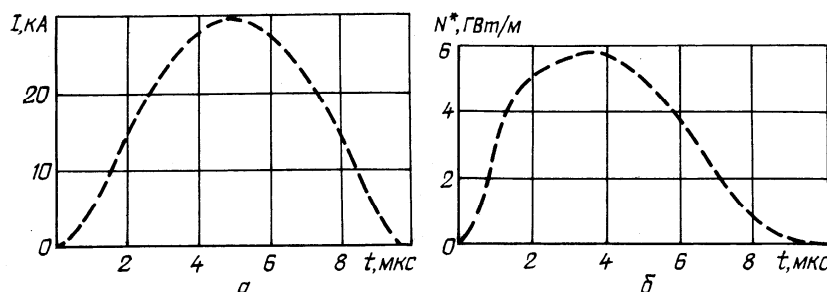


Рис. 5

$f, \%$	10,5	12	15	20	25
$l, \text{м}$	0,027	0,021	0,016	0,012	0,01
$C, \text{мкФ}$	2,326	2,991	3,925	5,234	6,281
$L, \text{мкГн}$	2,547	1,981	1,51	1,132	0,9435
$U_3, \text{кВ}$	66,84	51,36	38,74	29,2	24,54
$W^*, \text{кДж/м}$	34,83	33,7	32,12	30,43	28,86

$$W^* = \int_0^{\tau_1} N^*(t) = 31,93 \text{ кДж/м} \quad (19)$$

так и отсутствием физических противоречий с имеющимися представлениями о процессах, протекающих в рассматриваемых системах.

**Заключение.** Разработан подход по оптимизации ЭГИ технологий

путем выбора соответствующих параметров и режимов работы высоковольтных электроразрядных емкостных источников энергии, обеспечивающих необходимое по интенсивности и форме давление  $P(t)$  на объекте обработки для устройств по электрогидроимпульсной обработке материалов.

Предложены математические модели для каналоформирующей и электротехнической подсистем, позволяющие впервые на базе решения обратной задачи методом численного моделирования выполнять оптимизацию электрогидроимпульсных технологий в целом с соответствующим выбором параметров и режимов энергоисточника с учётом конструктивных особенностей электродных систем и свойств рабочей среды.

Для оптимизации электрогидроимпульсных технологий, в которых в качестве воздействия на объект обработки используется волна сжатия, то есть задан импульс давления  $P(t)$  (штамповка, разрушение негабаритов), необходимо проводить расчёт по полной схеме, показанной на рис. 1. В случае ЭГИ технологий, где применяется непосредственно высоковольтный разряд на объект обработки, и параметром, определяющим интенсивность и характер воздействия на объект, служит давление в

канале разряда  $P_a(t)$  (очистка отливок, снятие остаточных напряжений), оптимизация выполняется на базе ЭДПС, КФПС, ЭТПС.

1. Блащенко А.Д., Шишов А.М. Аппроксимация исходных временных зависимостей тока и напряжения для формирования схемной функции, обеспечивающей синтез импульсного источника энергии // Материалы XII Межд. науч. шк.-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». – Николаев: КП «Николаевская обл. тип». – 2005. – С. 137–138.
2. Вовк И.Т., Друмирецький В.Б., Кривицький Е.В., Овчинникова Л.Е. Управление электрогидроимпульсными процессами. – Киев.: Наук. думка, 1984. – 188 с.
3. Вовченко О.І. Високовольтні електророзрядні системи з керуванням перетворенням енергії: Автореф. дис... д-ра техн. наук / НАН України, Ін-т електродинаміки. – К., 2002. – 33 с.
4. Вовченко А.И., Цуркин В.Н., Швец И.С. Перспективы развития исследований при проектировании электроразрядных импульсных технологий // Материалы XII Межд. науч. шк.-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». – Николаев: КП «Николаевская обл. тип». – 2005. – С. 3 – 4.
5. Вовченко А.И., Посохов. А.А. Управляемые электровзрывные процессы в конденсированных средах. – Киев: Наук. думка, 1992. – 168 с.
6. Вовченко А.И., Шомко В.В., Шишов А.М. Математическое моделирование и оптимизация электрогидроимпульсных технологических процессов // Техн. електродинаміка. – 2005. – №3. – С. 68–73.
7. Горovenko Г.Г., Ивлиев А.И., Малюшевский П.П., Пастухов В.Н. Электровзрывные силовые импульсные системы. – К.: Наук. думка, 1987. – 220 с.
8. Гулый Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий. – К.: Наук. думка, 1990. – 208 с.
9. Кривицький Е.В., Петриченко В.Н., Бондарец Л.М. Исследование энергетических характеристик предпробойной стадии подводного искрового разряда // Журн. техн. физики. – 1977. – Т.47. – Вып.2. – С. 319–325.
10. Кривицький Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с.
11. Крутиков В.С. Волны, окружающие расширяющийся проницаемый цилиндр в сжимаемой среде // Доклады РАН. – 1999. – Том 368. – №6. – С. 755–758.
12. Крутиков В.С. Об одной обратной задаче для волнового уравнения в областях с подвижными границами и об итерационном методе определения функций управления // Доклады РАН. – 2006. – Том 406. – №1. – С.1–5.
13. Кузнецкин И.П. Импульсный пробой и канал разряда в жидкости: Дис... канд. техн. наук. 05.09.05 / Моск. энерг. ин-т. – М., 1967. – 186 с.
14. Исследовать методы управления импульсными процессами при электровзрывном преобразовании энергии: Отчет о НИР (заключительный) / Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины. Руководитель А.И.Вовченко; № ГР 0101U 005362; Инв. № 942. – НС. – Николаев, 2003. – 266 с.
15. Окунь И.З. Исследования электрических характеристик импульсного разряда в жидкости // Журн. техн. физики. – 1969. – Т.39, вып. 5. – С. 837–849.
16. Романов В.Г., Кабанихин С.И., Пухначева Т.П. Обратные задачи электродинамики / Под. ред. М.М.Лаврентьева. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984. – 202 с.
17. Шамко В.В., Кучеренко В.В. Теоретические основы инженерных расчетов электрических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда. – Николаев, 1991. – 51 с. (Препр. / НАН Украины; Ин-т импульсных процессов и технологий; №20).

Надійшла 17.03.09