

УДК 532

# О ВОССТАНОВЛЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛА ПОДВОДНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА ПО ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТИ

Г. А. БАРБАШОВА

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев**Получено 27.07.2006*

Обосновывается возможность применения метода подбора для решения обратной гидродинамической задачи восстановления кинематических и динамических характеристик канала подводного искрового разряда по заданному давлению в жидкости. Приведен пример решения задачи.

Обґрунтовано можливість використання методу підбору для розв'язання оберненої гідродинамічної задачі відновлення кінематичних та динамічних характеристик каналу підводного іскрового розряду за заданим тиском у рідині. Наведено приклад розв'язання задачі.

The possibility of the selection method application is grounded for solving the reversed hydrodynamic problem of underwater spark discharge channel cinematic and dynamic characteristics restoration by the set dependence of pressure in liquid. An example for the problem solution is given.

## ВВЕДЕНИЕ

Традиционно при разработке разрядноимпульсных технологий (РИТ) сначала проектируется технологическое устройство, а затем путем изменения его характеристик подбирается режим, наиболее приемлемый для конкретной РИТ [1]. То есть разработка устройства и подбор режимов его функционирования происходят изолировано друг от друга.

Целесообразно объединить эти исследования, то есть разработать программу, при помощи которой по известной гидродинамической нагрузке, создающей наиболее благоприятные условия для обработки объекта, сконструировать такой энергоисточник, который бы обеспечивал эту нагрузку.

Выполнение данной работы состоит из решения цепочки обратных задач [2]: гидродинамической задачи восстановления кинематических и термодинамических характеристик канала электрического разряда по известной эпюре время – давление в жидкости, задачи восстановления электродинамических характеристик разряда и задачи определения параметров и структуры импульсных источников энергии.

Настоящая работа посвящена решению одной из этих задач — обратной гидродинамической задачи восстановления кинематических и термодинамических характеристик канала электрического разряда в воде по заданной зависимости давления от времени в точке окружающей канал жидкости. Работа является продолжением [3].

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В точке жидкости, находящейся на известном расстоянии от создаваемого электроразрядного устройства (ЭРУ), задается зависимость давления от времени (гидродинамическая нагрузка на обрабатываемый объект). Необходимо определить расстояние между электродами  $l$ , вводимую электрическую мощность  $N(t)$ , давление в образующейся при электрическом разряде плазменной полости  $P_a(t)$ , ее радиус  $a(t)$ , скорость расширения  $\dot{a}(t)$  и объем  $V_a(t)$ .

Отметим здесь следующее. Ранее Г.А.Атановым и его сотрудниками вариационным методом была решена задача идентификации параметров в канале подводного искрового разряда по заданной временной зависимости давления на стенке сосуда (см., например, [4]). Обратная гидродинамическая задача при малых (до 200 м/с) скоростях расширения канала разряда решена также В.С.Крутиковым [5]. В обоих случаях исследования выполнялись в одномерном приближении течения жидкости, что не дает возможности определить, в частности, расстояние между электродами и объем плазменной полости. Поэтому задачу нужно решать, как минимум, в двумерной постановке.

Полагаем, что ЭРУ имеет осевую симметрию, а образующаяся при электрическом разряде полость в начальный момент времени имеет форму прямого кругового цилиндра конечной длины  $l$  и радиуса  $a_0$ .

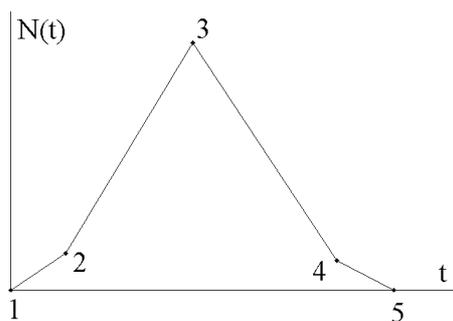


Рис. 1. Ломаная линия, моделирующая закон ввода мощности

## 2. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для решения поставленной задачи используем метод подбора [6].

Пусть задано операторное уравнение

$$Az = u, \quad (1)$$

где  $z$  – неизвестное;  $z \in F$ ,  $u \in U$ ,  $F$ ,  $U$  – метрические пространства [7];  $A$  – оператор, отображающий  $F$  на  $U$ .

Решение методом подбора состоит в том, что для элементов  $z$  заданного подкласса возможных решений  $M \subset F$  вычисляется оператор  $Az$ , то есть решается прямая задача. В качестве приближенного решения берется  $z_0 \in M$ , на котором

$$\rho_U(Az_0, u) = \inf_{z \in M} \rho_U(Az, u), \quad (2)$$

где  $\rho_U$  – расстояние в пространстве  $U$ .

Условием существования решения уравнения (1) является компактность множества  $M$  [6], поэтому при решении практических задач в качестве  $M$  берется множество элементов, зависящих от конечного числа меняющихся в ограниченных промежутках параметров. В этом случае  $M$  – замкнутое множество конечномерного пространства, что является необходимым и достаточным условием его компактности [7].

В том случае, когда  $u \in U$  определены приближенно, ищется квазирешение задачи [6]  $\bar{z}$ , для которого

$$\rho_U(A\bar{z}, u) = \inf_{z \in M} \rho_U(Az, u), \quad (3)$$

Квазирешение существует, если  $M$  – компактное множество, и может быть не единственным.

Постановка прямой задачи о расширении заполненной плазмой цилиндрической полости в неограниченном пространстве сжимаемой жидкости и метод ее решения подробно описаны в работе

[3]. Там же показано, что закон ввода мощности в канал разряда можно моделировать состоящей из четырех звеньев ломаной линией. Эта линия определяется заданием координат пяти точек (рис. 1). Первая точка находится в начале координат, третья определяется значением амплитуды мощности  $N_m$  и временем ее достижения  $\tau_N$ , пятая имеет координаты  $t = \tau$  ( $\tau$  – длительность первого полупериода времени ввода энергии, которым и ограничимся в данном исследовании) и  $N = 0$ . Для определения координат второй и четвертой точек были проанализированы кривые мощности, полученные по экспериментальным данным и приведенные в литературе (в частности, в статье [8]). Результаты анализа показали, что можно принять для второй точки  $t = 0.3 \cdot \tau_N$ ,  $N = 0.15 \cdot N_m$ , а для четвертой –  $t = 0.85 \cdot \tau$ ,  $N = 0.12 \cdot N_m$ .

Таким образом, закон ввода электрической мощности определяется заданием длительности первого полупериода времени ее ввода  $\tau$ , максимальным значением мощности  $N_m$  и временем его достижения  $\tau_N$ . Для решения прямой задачи еще необходимо знать начальные значения радиуса канала разряда  $a_0$ , скорости его расширения  $\dot{a}_0$ , давления в канале  $(P_a)_0$  и его длины  $l$ , а также начальные значения гидродинамических характеристик окружающей канал жидкости. Последние полагаем равными своим значениям в покоящейся жидкости при атмосферном давлении. Многочисленные расчеты показали, что начальные значения  $a_0$ ,  $\dot{a}_0$  и  $(P_a)_0$  слабо влияют на давление в жидкости, поэтому приняли  $a_0 = 1.2$  мм (среднестатистическое значение, полученное экспериментально [9]),  $\dot{a}_0 = 0$ ,  $(P_a)_0 = 6$  МПа. Для определения величин, задающих закон ввода мощности в канал разряда и начальную длину канала, были установлены диапазоны изменения параметров электрической цепи и межэлектродного промежутка в различных разрядноимпульсных технологиях. Затем по эмпирическим формулам [10] вычислены отрезки изменения значений  $l$ ,  $N_m$ ,  $\tau$  и  $\tau_N$ . В результате получили:  $l = (10 - 220)$  мм,  $N_m = (5 - 560)$  МВт,  $\tau = (2.5 - 40)$  мкс (рассматриваем только кратковременные разряды [10]), а  $0.37 \cdot (\tau \cdot 0.5) \leq \tau_N \leq 0.95 \cdot (\tau \cdot 0.5)$ .

Варьируя четыре параметра в указанном для каждого промежутке изменения с заданным шагом, получим конечное множество  $M$  элементов шестимерного (пять точек ломаной плюс длина канала разряда) арифметического евклидова пространства  $R^6$  (множество упорядоченных групп из шести действительных чисел) [7]. Расстояние между двумя элементами  $y = (y_1, \dots, y_6)$  и  $z = (z_1, \dots, z_6)$

$$\rho(y, z) = \left[ \sum_{i=1}^6 (y_i - z_i)^2 \right]^{1/2}.$$

Элементы множества  $M$  зависят от конечного числа параметров, меняющихся в ограниченных пределах, поэтому  $M$  – замкнутое множество конечномерного пространства и, следовательно, множество возможных решений обратной гидродинамической задачи компактно [7].

К настоящему времени виды нагрузки на обрабатываемый объект в разрядноимпульсных технологиях не систематизированы, поэтому в проводимых здесь исследованиях использовались зависимости давления от времени, которые были получены при решении прямой задачи с законом ввода мощности и длиной межэлектродного промежутка, определенными экспериментально. Эти зависимости относим к пространству всех непрерывных ограниченных действительных функций, определенных на сегменте  $[a, b]$ , –  $C[a, b]$  [7]. Расстояние между двумя элементами  $y(t) \in C[a, b]$  и  $z(t) \in C[a, b]$

$$\rho(y, z) = \max_{a \leq t \leq b} |z(t) - y(t)|.$$

Таким образом, имеем метрические пространства  $R^6$ , содержащие компактное множество возможных решений обратной задачи  $M$ , и  $C[a, b]$ , включающее в себя задаваемые и получаемые при решении методом подбора зависимости давления от времени в точке жидкости, а также оператор  $A$ , отображающий  $R^6$  на  $C[a, b]$ , – система двумерных нелинейных уравнений газовой динамики с граничными и начальными условиями.

### 3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Закон ввода электрической мощности и другие электродинамические характеристики разряда, экспериментальные данные которого использовались при определении эпюры давление – время, указаны в статье [2]. Рассматриваем разряд с  $\eta = 0.94$  ( $\eta$  – доля энергии разряда, выделившаяся в течение первого его полупериода [10]). Путем решения прямой задачи о расширении плазменной полости в жидкости определяем давление в точке с координатами  $r = r_1 = 0.09$  м,  $z = 0$  (ось  $Or$  находится в экваториальной плоскости цилиндрического канала разряда, а  $Oz$  – на оси симметрии). Получаем кривую  $p(t)$ , заданную таблично:

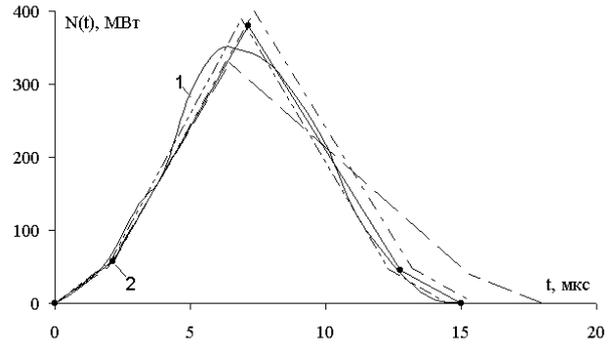


Рис. 2. Временные зависимости мощности, вводимой в канал разряда

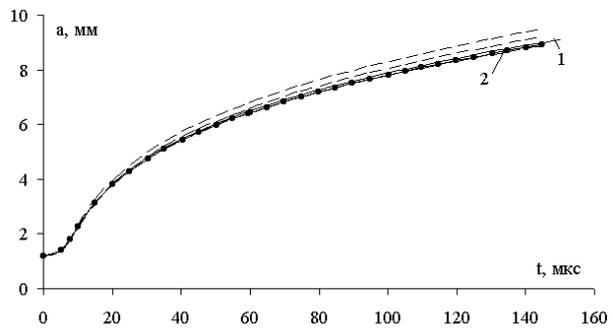


Рис. 3. Радиус канала разряда в плоскости срединного сечения при различных законах ввода мощности

$p_i = p(t_i)$ ,  $1 \leq i \leq n$ ,  $n$  – число временных слоев на отрезке  $[a, b]$ .

Затем для элементов множества возможных решений обратной задачи  $M$  решаем прямую задачу. Полученную кривую зависимости давления от времени в точке  $r = 0.09$ ,  $z = 0$  –  $pp(t)$  сравниваем с кривой  $p(t)$  в те же моменты времени  $t_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ , то есть находим расстояние между элементами пространства  $C[a, b]$  следующим образом:

$$\rho(pp, p) = \max_{1 \leq i \leq n} |pp_i - p_i|.$$

Если расстояние между кривыми меньше  $\epsilon = 0.05 \cdot P_m$  ( $P_m$  – амплитуда задаваемого давления), то заданные и полученные в ходе решения прямой задачи характеристики канала разряда есть решение обратной задачи.

На рис. 2 – 5 приведены результаты решения прямой задачи о расширении плазменной цилиндрической полости в сжимаемой жидкости, полученные при задании экспериментальной кривой закона ввода мощности в разрядный канал (кри-

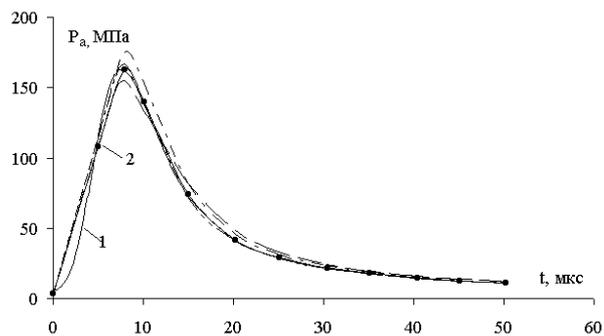


Рис. 4. Давление в канале разряда при различных законах ввода мощности

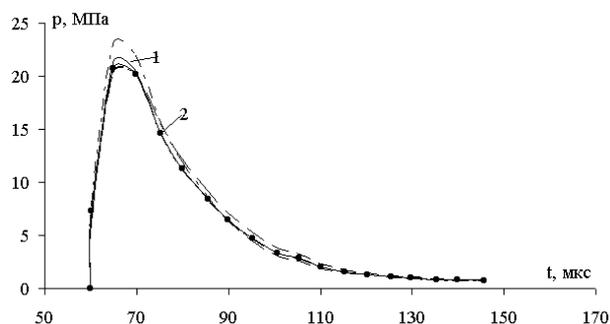


Рис. 5. Зависимость давления от времени в срединном сечении канала на расстоянии  $r_1=0.09$  м от оси симметрии при различных законах ввода мощности

вые 1), и несколько приближений решения обратной задачи, полученных методом подбора. Номером 2 отмечены закон ввода мощности (рис. 2), радиус канала в экваториальной плоскости (рис. 3) и давление в канале (рис. 4), при которых полученная кривая давления в точке жидкости имеет наименьшее уклонение от заданной в постановке обратной гидродинамической задачи кривой давления (рис. 5, кривые 1 и 2) –  $0.04 \cdot P_m$ . Это решение получено при  $N_m = 380$  МВт,  $\tau = 15$  мкс,  $\tau_N = 1.125$  мкс и  $l = 0.2$  м.

Из результатов, приведенных на рис. 2, следует, что скорости нарастания мощности у всех полученных решений обратной задачи близки между собой и примерно равны скорости нарастания мощности, изображаемой кривой 1. Кроме того, величины вводимой в канал разряда энергии  $E = \int_0^{\tau} N(t)dt$  практически равны. Поэтому кинематические и динамические характеристики канала разряда (рис. 3 и 4) и жидкости (рис. 5) отличаются несущественно, в частности, амплитуда давления в канале и воде, что согласуется с получен-

ными ранее результатами (см. [11]).

## ВЫВОДЫ

Таким образом, варьируя величины максимума мощности электрического разряда в воде, времени его достижения, длительности первого полупериода разряда и начальной длины межэлектродного промежутка, можно методом подбора приближенно решить задачу восстановления кинематических и динамических характеристик канала электрического разряда в воде.

Автор благодарит кандидата физико-математических наук Шомко Василия Владимировича за внимание и большую помощь в работе.

1. Гулый Г. А. Научные основы разрядноимпульсных технологий. – Киев: Наук. думка, 1990. – 208 с.
2. Вовченко А. И., Шомко В. В., Шишов А. М. Математическое моделирование и оптимизация электрогидроимпульсных технологических процессов // Техн. электродинамика. – 2005. – N 3. – С. 68–73.
3. Барбашова Г. А., Вовченко А. И., Шомко В. В. Выбор формы задания мощности для численного решения обратной гидродинамической задачи восстановления кинематических и динамических характеристик разрядного канала // Электронная обработка материалов. – 2006. – N 3. – С. 54–57.
4. Атанов Г. А. Вариационная задача идентификации параметров в канале разряда при подводном электрическом взрыве // Электрические и гидродинамические процессы электрического разряда в конденсированных средах. – Киев: Наук. думка, 1987. – С. 54–57.
5. 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. – Т. 406, N 3. – С. 1–5.
6. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
7. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1989. – 624 с.
8. Шамко В. В. Интегральные характеристики подводного искрового разряда // Журнал техн. физики. – 1978. – Т. 48, N 5. – С. 967–971.
9. Жекул В. Г. Экспериментальные исследования начальных характеристик канальной стадии разряда в воде // Подводный электрический взрыв. – Киев: Наук. думка, 1985. – С. 3–7.
10. Кривицкий Е. В., Шамко В. В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. – Киев: Наук. думка, 1979. – 208 с.
11. Шамко В. В., Вовченко А. И., Каменская Л. А., Барбашова Г. А. Управление гидродинамическими процессами при моноимпульсном электровзрывном преобразовании энергии // Электронная обработка материалов. – 2005. – N 1. – С. 61–67.