

Г.А.БАРБАШОВА, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ВЗРЫВЕ МИКРОПРОВОДНИКА ПОЛОСТИ ПО ЗАДАННОМУ ДАВЛЕНИЮ В ОКРУЖАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Запропоновано спосіб відновлення характеристик плазмового каналу, що створюється внаслідок електровибуху мікропровідника у рідині, за відомою кривою тиску у точці рідини. Цей спосіб полягає у послідовному розв'язанні обернених гідродинамічної та електродинамічної задач.

The way of restoring plasma channel formed during the process of micro conductor explosion in liquid, characteristics from the knowledge of pressure curve at some point inside liquid is offered. The method is based on the sequential solution of the corresponding hydrodynamic and electrodynamic problems.

1 Введение. При изучении свойств различных объектов и процессов весьма распространенными являются ситуации, в которых объект или процесс либо недоступны для непосредственного наблюдения, либо оно связано с большими затратами. В этих случаях приходят к необходимости решения обратных задач. Решением таких задач часто пользуются и при проектировании нового оборудования, поскольку в этом случае актуальной является задача определения характеристик устройства, при которых обрабатываемый объект получил бы наиболее эффективное воздействие.

Авторы работы [1] предложили новый подход к проектированию источника электрической энергии, используемого в разрядноимпульсных технологиях. Этот подход заключается в следующем. Сначала решается обратная гидродинамическая задача: по известной зависимости давления от времени в точке жидкости (гидродинамическая нагрузка на обрабатываемый объект) восстанавливаются геометрические, кинематические и термодинамические характеристики образующегося при взрыве микропровідника канала разряда. Затем по этим данным определяются разрядный ток и напряжение на канале (обратная электродинамическая задача). На последнем этапе – входные параметры электроразрядной системы.

В статье [2] предложен способ решения обратной гидродинамической задачи – задачи восстановления геометрических, кинематических и термодинамических характеристик образующегося в результате взрыва микропровідника в воде канала разряда, в [1] – способ решения обратной электродинамической задачи – задачи восстановления электродинамических характеристик канала по результатам решения первой. А в [3] решена задача реконструкции характеристик плазменного канала по заданной двухпульсационной кривой давления в точке жидкости предложенными в [1, 2] способами.

Цель настоящей работы: путем последовательного решения обратных

гидро- и электродинамической задач показать адекватность используемых в работах [1 - 3] математических моделей реальному процессу.

2 Постановка задачи и метод ее решения. Постановку задачи формулируем следующим образом. На известном расстоянии r_1 от электроразрядного устройства задается зависимость давления от времени $p(r_1, t)$. Необходимо определить геометрические, кинематические, термодинамические и электродинамические характеристики образующегося при взрыве микропроводника канала разряда, при которых может быть получена зависимость давления от времени, отличающаяся от заданной на допустимо малую для практики величину.

При решении задачи полагали следующее. Канал разряда заполнен плотной однородной низкотемпературной плазмой и расположен в неограниченном объеме идеальной сжимаемой жидкости. Стенки канала непроницаемы. Точка r_1 расположена в плоскости срединного сечения микропроводника.

Сначала путем решения обратной гидродинамической задачи определяем геометрические (длина l и радиус микропроводника a_0), кинематические (радиус канала и скорость его расширения) и термодинамическую (давление в канале) характеристики плазменного канала. Названные характеристики являются исходными данными для обратной электродинамической задачи, в результате решения которой определяются электрическая мощность, разрядный ток, напряжение и другие электродинамические характеристики канала разряда.

Обратная гидродинамическая задача решается методом подбора [4]. То есть решается прямая задача о расширении цилиндрической полости в идеальной сжимаемой жидкости. При этом движение жидкости описывается системой двумерных нелинейных уравнений газовой динамики, записанных в цилиндрической системе координат [5]. На внутренней границе расчетной области (стенка канала разряда) требуется выполнение условия баланса энергии [6], на внешней (ударная волна) – условий динамической совместности [5]. Подробная постановка задачи о расширении цилиндрической полости в сжимаемой жидкости и метод ее решения приведены в работе [3].

При решении обратной гидродинамической задачи радиус канала разряда, скорость его расширения и давление в нем определяются заданием закона ввода электрической мощности в канал, начальными значениями длины и радиуса микропроводника и начальным значением давления. Полагаем, что начальный радиус и давление известны. Закон ввода электрической мощности в разрядный канал задаем состоящей из четырех отрезков ломаной линией [8]. Координаты точек ломаной определяются по значениям длительности первого полупериода ввода мощности τ_1 , амплитуды мощности N_m и времени достижения амплитуды τ_N [2]. Варьируя τ_1 , N_m , τ_N и l , получаем компактное множество возможных решений обратной задачи M , принадлежащее шестимер-

ному (пять точек ломаной и длина микропроводника) арифметическому евклидову пространству R^6 [8]. Кривые зависимости давления от времени в точке жидкости принадлежат пространству непрерывных ограниченных функций, определенных на отрезке $[t_1, t_2]$ (t_1 – время прихода фронта ударной волны в точку r_1 , t_2 – конечное время импульса давления), – $C_{[t_1, t_2]}$ [8].

Для элементов множества M решаем задачу о расширении цилиндра в жидкости. Полученную кривую зависимости давления от времени в точке r_1 – $pp(r_1, t)$ сравниваем с кривой $p(r_1, t)$ в метрике пространства $C_{[t_1, t_2]}$, то есть определяем расстояние между кривыми давления,

$$\rho(p, pp) = \max_{t_1 \leq t \leq t_2} |p(r_1, t) - pp(r_1, t)| < \varepsilon,$$

где $\varepsilon = 0,05 \cdot p_m$ (p_m – максимум кривой $p(r_1, t)$). Если неравенство выполняется, то задаваемые элементы множества M есть решение обратной гидродинамической задачи [2]. Получаемые при этом радиус, скорость расширения канала разряда и давление в нем – исходные данные для решения обратной электродинамической задачи.

Математическую модель процесса восстановления электродинамических характеристик взрыва микропроводника составляют уравнение баланса энергии [6], закон Ома, линейная взаимосвязь между давлением и удельной электропроводностью и другие соотношения [1, 3]. По полученным при решении обратной гидродинамической задачи зависимостям от времени радиуса, скорости расширения канала разряда и давления в нем, как и длине микропроводника, находим функции электрической мощности и удельной электропроводности, а с привлечением определяющих электродинамических соотношений – функции тока и напряжения [1, 3].

Для выполнения поставленной цели было сделано следующее. По осциллограммам разрядного тока и напряжения на канале, которые взяты из статьи [1] (здесь приводится решение задач для электровзрыва, в котором доля энергии, выделившаяся в первый полупериод разряда, $\eta = 0,94$), определена электрическая мощность, входящая в условие баланса энергии [6]. С таким законом ввода электрической мощности решена гидродинамическая задача о расширении цилиндрической полости в жидкости. При этом фиксировалось давление в точке $r_1 = 0,09$ м – $p(r_1, t)$.

Затем последовательно были решены обратные гидро- и электродинамические задачи: по полученной кривой зависимости давления от времени в точке жидкости были восстановлены радиус и скорость расширения канала разряда, давление в нем и длина микропроводника, по которым определены электрическая мощность, разрядный ток, напряжение на канале и другие характеристики.

3 Результаты решения задачи. Некоторые результаты расчетов и эксперимента приведены на рис. 1-6.

Необходимо отметить следующее. Решение обратной гидродинамиче-

ской задачи не единственно. Из множества решений выбираем то, для которого расстояние $\rho(p, pp)$ наименьшее. Приводимые ниже кривые давления в точке жидкости разнятся на $0,04 \cdot p_m$.

На рис. 1 дана вводимая в канал разряда электрическая мощность, полученная по экспериментальным данным, – кривая 1, одно из решений обратной гидродинамической задачи (при этом $l = 0,2$ м) – линия 2 и соответствующее ему решение обратной электродинамической задачи – кривая 3.

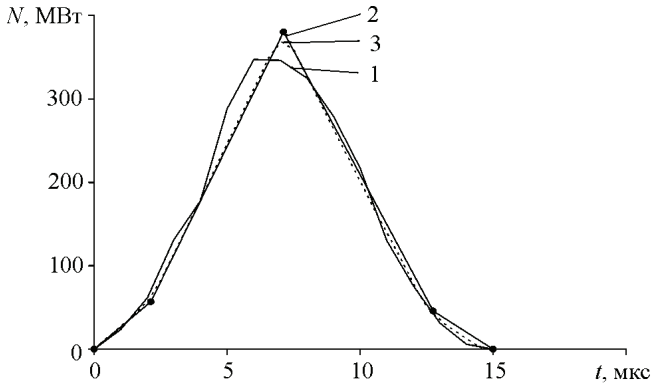


Рисунок 1 – Законы ввода электрической мощности в канал

Зависимости давления от времени в заданной точке жидкости показаны на рис. 2. Кривая 1 получена при решении прямой гидродинамической задачи, кривая 2 – при решении обратной (с законом ввода мощности 2 на рис. 1).

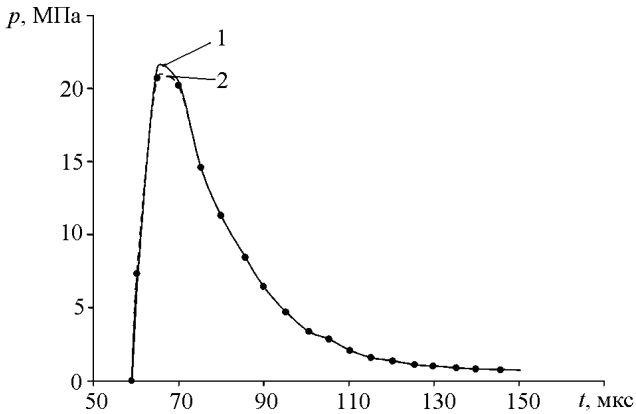
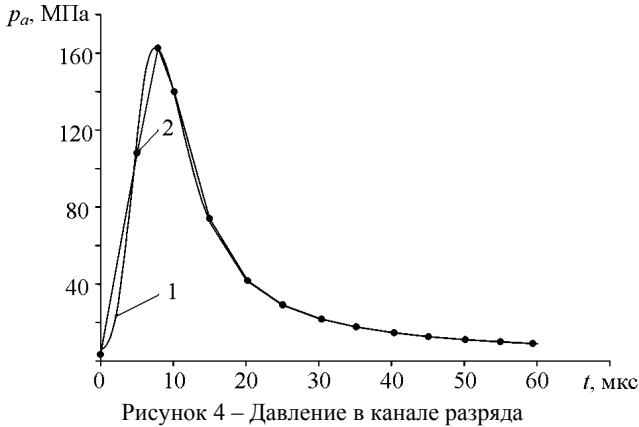
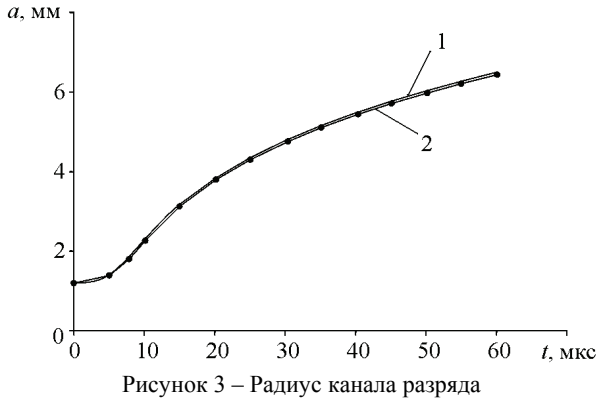


Рисунок 2 – Давление в точке жидкости

Далее приведены временные зависимости радиуса канала разряда в плоскости срединного сечения микропроводника (рис. 3) и давления в кана-

ле (рис. 4). На обоих рисунках кривая 1 получена при законе ввода мощности 1 (рис. 1), кривая 2 – при законе 2 (рис. 1).



Полученные экспериментально и при решении обратной электродинамической задачи разрядный ток и напряжение на канале показаны на рис. 5 и 6 соответственно. Здесь кривые 1 – экспериментальные, кривые 2 – расчетные. Следует отметить, что напряжение на канале разряда определяется по закону Ома и, поскольку ток в начальный момент времени равен нулю, а напряжение – конечная величина, то его значение определено при помощи экстраполяции.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что экспериментальные данные и результаты последовательного решения обратных гидро- и электродинамических задач разнятся несущественно.

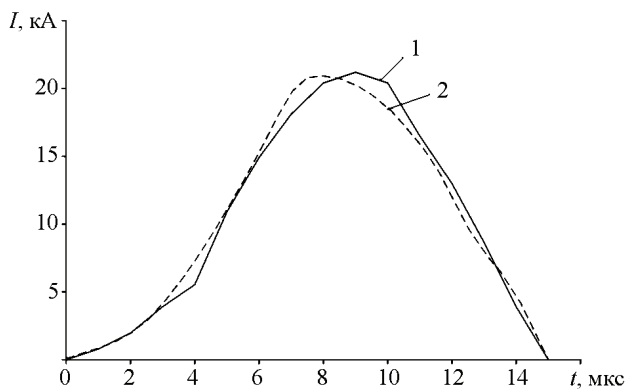


Рисунок 5 – Ток в канале разряда

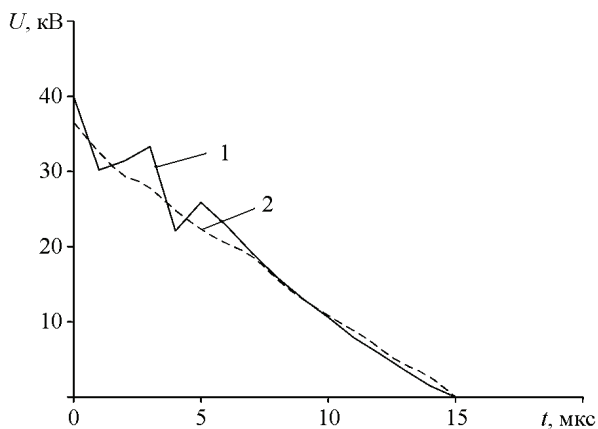


Рисунок 6 – Напряжение на канале разряда

4 Вывод. Таким образом, разработанные математические модели для решения обратных гидродинамической и электродинамической задач адекватны реальным процессам, имеющим место при электрическом взрыве микропроводника в воде.

Список литературы: 1. *Вовченко А.И., Шомко В.В., Шишов А.М.* Математическое моделирование и оптимизация электрогидроимпульсных технологических процессов // *Технічна електродинаміка*. – 2005. – № 3. – С. 68-73. 2. *Барбашова Г.А.* О восстановлении характеристик канала подводного искрового разряда по временной зависимости давления в жидкости // *Прикладна гідромеханіка*. – 2007. – Т. 9, № 4. – С. 69-72. 3. *Барбашова Г.А., Тертилов Р.В.* Восстановление характеристик канала разряда по двухпульсационной зависимости давления от времени в точке жидкости // *Вестник НТУ «ХПИ»: Техніка і електрофізика високих напруг*. – 2009. – Вып. 11. – С. 8-15. 4. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 288 с. 5. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. *С.К.Годунова*. – М.: Наука, 1976. – 400 с. 6. *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. – М.: Нау-

ка, 1971. – 155 с. 7. 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 // ЭОМ. – 2006. – № 3. – С. 54-57. 8. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1989. – 624 с.

Поступила в редколлегию 22.03.2010