

4. В. Н. Постнов, В. С. Соловьев.— В сб.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1977.
 5. С. К. Годунов и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М., Наука, 1976.

О РАСЧЕТЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ НА ЭВМ

В. В. Иванов
(Николаев)

Цель работы — составление системы уравнений, позволяющей получить детальное описание подводных электрических взрывов с помощью ЭВМ. Электрический взрыв — мощный (16^9 – 10^9 Вт) высоковольтный подводный разряд длительностью $\sim 10^{-5}$ с. За последние десятилетия этот процесс получил широкое распространение в самых разнообразных областях науки и техники: в штамповке, развальцовке труб, дроблении и т. д. [1, 2]. Экспериментальные и теоретические исследования подводного электрического взрыва представляют значительные трудности из-за многообразия, коррелированности и нелинейности сопровождающих их процессов. Этим и объясняется отсутствие в настоящее время детального математического описания процесса.

Как показывают исследования [3–7], в канале разряда развиваются давления до $3 \cdot 10^9$ Па и температуры 10^4 – $5 \cdot 10^4$ К. Это приводит к образованию ударных волн в жидкости и низкотемпературной, плотной, неидеальной плазмы внутри канала разряда. Причем плотность частиц в канале меняется вследствие его расширения и испарения частиц со стенок. При описании гидродинамических явлений воспользуемся методом характеристик [8, 9], для описания свойств плазмы — теорией, развитой в [10–12], при расчете скорости поступления частиц в канал разряда примем, так же как и в [3], что в основном это происходит за счет лучистой теплопроводности.

Далее будем исходить из экспериментально установленного факта, что все характеристики разряда определяются четырьмя параметрами: начальным напряжением U на накопительной емкости C , индуктивностью цепи L и длиной разрядного промежутка l . В этом случае уравнение электрической цепи запишется [3] так:

$$d^2U/dt^2 + R_k/L \cdot dU/dt + U/LC = 0, \quad (1)$$

где

$$R_k = l/\pi a^2 \sigma \quad (2)$$

— сопротивление канала разряда, переменное во времени; a — радиус канала разряда; σ — удельная проводимость. Величина последней связана с характеристиками плазмы следующими соотношениями [10–12]:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \frac{n_e}{n_e + n^*} \frac{1}{\sigma} \int_0^\infty \frac{\varepsilon^2 \exp(-\varepsilon) d\varepsilon}{1 + \frac{0,58 n_a Q_a}{(n_i + n^*) Q_e}}, \quad (3)$$

где σ_2 — спитцерова проводимость; $\varepsilon = \beta E$; E — энергия электрона; n_e , n_a , n^* — концентрации свободных электронов, атомов и слабосвязанных электронов; Q_a и Q_e — транспортные сечения столкновений электронов с атомами и ионами. Величины последних рассчитывались по методике [12]. Уравнение (3) дает вклад свободных электронов. Проводимость слабосвязанных электронов n^* характеризуется в системе СИ выражением [12]:

$$\sigma_3 = 26,3 \cdot 10^8 / T^{3/2} \cdot (\alpha^{5/3} + 0,73 \alpha^{7/3}) \quad (4)$$

и полная проводимость

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_3. \quad (5)$$

Для расчета электропроводности необходимо знать состав плазмы при данной температуре и давлении. В настоящей работе поведение кислородных и водородных ионов отождествляется, и плазма рассматривается как полностью водородная. Основанием к этому служит близость потенциалов ионизации ($\sim 13,6$ эВ) и отношений статусов основных состояний ионов и атомов ($\sim 1/2$). Тогда расчетные формулы

для определения уравнения состояния и состава плазмы будут выглядеть следующим образом [10]:

$$n_1 = z_e \left(1 + \frac{\alpha}{2} + z_i \Lambda_e^3 \sum_{\Pi} + \frac{\alpha^2}{4} \right), \quad (6)$$

$$\beta p_K = z_e \left(2 + \frac{2\alpha}{3} + z_i \Lambda_e^3 \sum_{\Pi} + \frac{\alpha^2}{4} \right), \quad (7)$$

где $\alpha = \beta e^2 \sqrt{4\pi \beta e^2 (z_e + z_i)}$ — плазменный параметр; $\sum_{\Pi} = \sum_{n=1}^{\infty} g_n (e^{-\beta E_n} - 1 + \beta E_n)$ — статистическая сумма Планка; g_n и E_n — соответственно статистический вес и энергия связи состояния n ; z_e и z_i — активности электронов и ионов; $\Lambda_e^3 = \hbar^3 \rho^{3/2} / (2\pi m)^{3/2}$, n_1 — концентрация суммы электронов и атомов; p_K — давление в канале разряда;

$$n_e = z_e (1 + \alpha/2 + \alpha^2/4 - 0,47\alpha^{2/3} - 0,33\alpha^{4/3}), \quad (8)$$

$$n^* = z_e (0,47\alpha^{2/3} + 0,33\alpha^{4/3}). \quad (9)$$

Электрическая энергия, вводимая в канал разряда, расходуется на перемещение жидкости, внутреннюю энергию плазмы и тепловые потери. Величину последних примем равной электромагнитному излучению, при этом канал разряда можно рассматривать как абсолютно черное тело [3—5]. Тогда баланс мощности для канала разряда определится уравнением

$$I^2 R_K = \frac{3}{2} \frac{dp_K V_K}{dt} + \frac{D}{3} \frac{dV_K (n_a + n_e + n^*)}{dt} + \frac{d(n_e + n^*)}{dt} V + 2\pi a l \sigma^* T^4 + p_K \frac{dV_K}{dt}, \quad (10)$$

где I — ток канала разряда; D — энергия диссоциации молекулы воды; V_K — объем канала; V — потенциал ионизации; a — радиус; σ^* — постоянная Стефана — Больцмана. В уравнении (10) энергия образования возбужденных атомов и слабосвязанных электронов принимается равной энергии ионизации.

Для расчета гидродинамических величин использовался метод характеристик [8, 9]. В этом случае уравнения гидродинамики цилиндрической симметрии при использовании уравнения состояния в форме Тэта преобразуются к следующему виду, удобному для численного интегрирования:

$$dr/dt = v + c, \quad dv + 2dc/(k-1) = -cv/r \cdot dt, \quad (11)$$

$$dr/dt = v - c, \quad dv - 2dc/(k-1) = cv/r \cdot dt, \quad (12)$$

где r, t — пространственная и временная координаты; v, c — гидродинамическая скорость и скорость звука; $k=7,15$.

Граничные условия на фронте ударной волны возьмем в аналогичном виде:

$$\Phi = \frac{v_1}{2} + \frac{1}{k-1} \frac{c_1^2 - c_0^2}{v_1},$$

$$c_1 = \sqrt{c_0^2 + \frac{k-1}{2} v_1} \sqrt{4c_0^2 + \left(\frac{k+1}{2}\right)^2 v_1^2 + \left(\frac{k-1}{2}\right)^2 v_1^2}. \quad (13)$$

Здесь Φ — скорость ударного фронта; величины с индексом 0 характеризуют покоящуюся жидкость, с индексом 1 — возмущенную.

В момент времени $t=0$, когда конденсатор заряжен до напряжения U и тока в цепи нет, соблюдается условие

$$dU/dt|_{t=0} = 0.$$

Остальные начальные условия не являются достаточно определенными и приняты равными $a_n = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м, $T = 15000$ К, $p_n = 10^8$ Па. Начальные условия выбирались так, чтобы они мало сказывались на результатах интегрирования и последние определялись в основном режимом выделения энергии.

Для расчета скорости поступления частиц в канал разряда за счет испарения воды со стенок воспользуемся соотношением из [3]:

$$dnV_K/dt = 2\pi a \sigma^* T^4 l / \lambda, \quad (14)$$

где n — суммарная концентрация всех частиц; λ — энергетическая «цена» частицы. Эта величина определялась экспериментально, на основе совпадения экспериментальных и вычисленных величин тока, напряжения, удельного и общего сопротивления, режима ввода энергии в канал, зависимости радиуса от времени и величины давления на расстоянии 0,08 м от оси канала разряда.

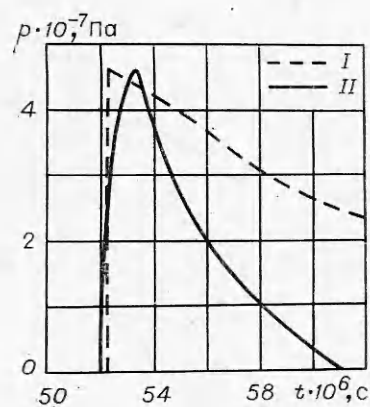


Рис. 1.

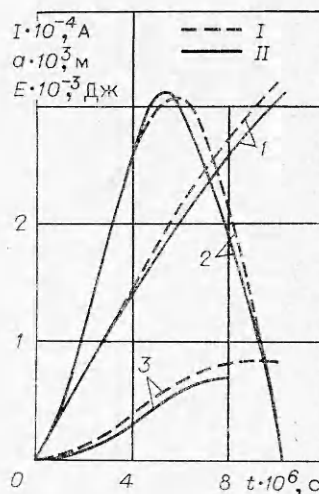


Рис. 2.

Для подводных электрических взрывов мощностью $5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^8$ Вт и длительностью $5 \div 20 \cdot 10^{-6}$ с, инициируемых тонкими проволочками (порядка нескольких микрон), величина λ имеет следующую зависимость от температуры:

$$\lambda = 3,3 \cdot 10^{-27} \cdot T^2 - 1,85 \cdot 10^{-22} \cdot T + 2,67 \cdot 10^{18}, \quad 11600 \leq T \leq 25520 \text{ К},$$

$$\lambda = 5,57 \cdot 10^{-28} \cdot T^2 - 3,98 \cdot 10^{-23} \cdot T + 7,28 \cdot 10^{-19}, \quad 25520 \leq T \leq 34800 \text{ К}. \quad (15)$$

Для примера на рис. 1, 2 показаны результаты расчетов (I) и экспериментов (II). Разряд имел следующие параметры: $U = 2 \cdot 10^4$ В, $C = 6 \cdot 10^{-6}$ Ф, $L = 1,12 \cdot 10^{-6}$ Г, $l = 0,045$ м. На рис. 1 приводятся характеристики волны сжатия на расстоянии 0,08 м от оси канала. На рис. 2 даются значения радиусов (I), тока (2) и энергии, выделяющейся в канал разряда (3). Так же обстоит дело и во всем исследованном интервале времен и мощностей.

Итак, в результате проведенного исследования составлена система дифференциальных уравнений, позволяющая с помощью ЭВМ рассчитать электрические, термодинамические и гидродинамические характеристики подводных электрических взрывов. Показано хорошее совпадение экспериментальных и вычисленных величин. Система может быть использована при проектировании и анализе работы электрогидравлических установок. Время реализации на ЭВМ БЭСМ-4М одного варианта порядка 1 ч.

Поступила в редакцию
25/VI 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Гулый, П. П. Малюшевский. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. Киев, Наукова думка, 1977.
2. Г. А. Гулый, Е. В. Кривицкий. — В сб.: Разрядно-импульсная технология. Киев, Наукова думка, 1978.
3. А. И. Иоффе. ПМТФ, 1966, 6.
4. Ю. А. Скворцов, В. С. Комельков, Н. И. Кузнецов. ЖТФ, 1960, 70, 10.
5. И. З. Окунь. ЖТФ, 1971, 41, 2.
6. К. А. Наугольных, П. А. Рой. Электрические разряды в воде. М., Наука, 1971.
7. В. В. Арсентьев. ПМТФ, 1965, 5.
8. Б. Л. Рождественский, Н. Н. Яненко. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. М., Наука, 1968.
9. В. В. Иванов, А. В. Иванов, И. С. Швец. — В сб.: Физические основы электрогидравлической обработки материалов. Киев, Наукова думка, 1978.
10. В. С. Воробьев, А. Л. Хомкин. ТВТ, 1977, 14, 6.
11. В. С. Воробьев, Л. Л. Хомкин. ТВТ, 1977, 15, 1.
12. А. Л. Хомкин. ТВТ, 1978, 16, 1.