

01;08

## Исследование эффекта нелинейности взаимодействующих ударно-акустических волн давления

© Ю.П. Муха, А.Л. Суркаев

Волжский политехнический институт (филиал)  
Волгоградского государственного технического университета, Волжский  
E-mail: vfaculty@volpi.ru

Поступило в Редакцию 18 февраля 2002 г.

Рассмотрен эффект нелинейности при взаимодействии двух идентичных ударно-акустических волн в конденсированной среде, генерируемых электрическим взрывом двух металлических проводников в камере цилиндрической симметрии.

Явление электрического разряда в конденсированных средах широко рассмотрено в современной научной литературе, в частности [1,2]. При осуществлении электрического взрыва металлического проводника в окружающей конденсированной среде возбуждается ударно-акустическая волна давления.

Целью предлагаемой работы является исследование процессов нелинейности, возникающих при взаимодействии двух идентичных ударно-акустических волн, генерируемых электрическим взрывом двух металлических проводников.

Данная работа является продолжением работы [3], в которой представлены результаты экспериментального исследования двух взаимодействующих ударно-акустических волн. В качестве регистратора давления применялся волноводный пьезокерамический датчик [4], который фиксировался на стенке цилиндрической взрывной камеры. В общем случае, уравнения гидродинамики нелинейны [5], поэтому в приближении волну конечной амплитуды можно представить в виде суммы двух членов: волны малой амплитуды  $p'$ , соответствующей линеаризованным уравнениям, и  $p''$  — квадратичной поправки, т. е:

$$p = p' + p''. \quad (1)$$

Для плоской волны в лагранжевых координатах справедливо уравнение

$$p'_{tt} - c_0^2 p'_{\xi\xi} = 0, \quad (2)$$

где индексы обозначают соответствующие производные. Для давления второго порядка уравнение выглядит следующим образом:

$$p''_{tt} - c_0^2 p''_{\xi\xi} = G(p'^2)_{tt}, \quad (3)$$

где  $G$  — коэффициент нелинейности, который определяется как

$$G = \frac{1}{\rho_0 c_0^2} \left[ 1 + \frac{1}{2} \rho_0 \left( \frac{dc^2}{dp} \right)_0 \right], \quad (4)$$

причем нуль в индексе при производной означает, что производную необходимо брать в точке  $p = 0$ .

Используя результаты экспериментальной работы [3], а также результаты других исследований, можно сделать вывод об экспоненциальном характере зависимости давления от времени. Предлагается использовать для определения параметра давления аналитическую зависимость вида

$$p(t) = a \left( t - \frac{\xi}{c_0} \right)^b e^{c(t - \frac{\xi}{c_0})}, \quad (5)$$

где  $a, b, c$  — коэффициенты, которые предлагается вычислить, используя экспериментальную кривую;  $\xi$  — координата. Приняв координату  $\xi$  за ноль, имеем

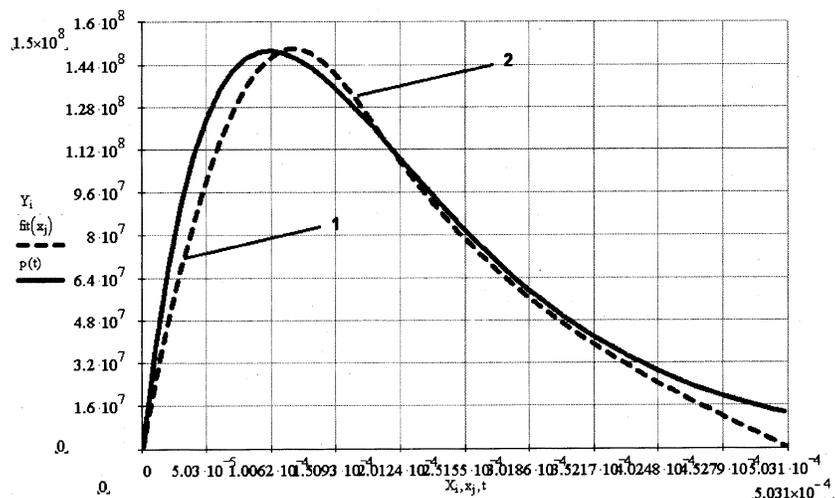
$$p(t) = at^b e^{ct}. \quad (6)$$

На рис. 1 представлены кривые экспериментальной и аналитической зависимости давления от времени, используя которые можно определить коэффициенты:  $a = 3.7 \cdot 10^{12} \text{Pa/s}$ ;  $b = 0.99$ ;  $c = -0.1 \cdot 10^5 \text{s}^{-1}$ . Вычисление площадей под соответствующими кривыми дает относительную погрешность  $\delta = 8.5\%$ .

При рассмотрении нелинейного взаимодействия двух плоских волн нарушается справедливый для линейного случая принцип суперпозиции и квадратичная поправка представляется в виде

$$p'' = \frac{1}{2} Gt(p_1'^2)_t + \frac{1}{2} Gt(p_2'^2)_t + Gt(p_1'p_2')_t, \quad (7)$$

где индексы 1, 2 соответствуют первой и второй волне. Производя одновременный взрыв идентичных проводников, в камере возбуждаются



**Рис. 1.** Зависимость давления падающей ударно-акустической волны от времени: 1 — экспериментальная кривая; 2 — аналитическая кривая.

две одинаковые ударно-акустические волны давления. Таким образом, используя (1) и условие эквивалентности волн, получаем результирующую волну давления с учетом квадратичной поправки:

$$p = 2p' + 2Gt(p'^2)_t. \quad (8)$$

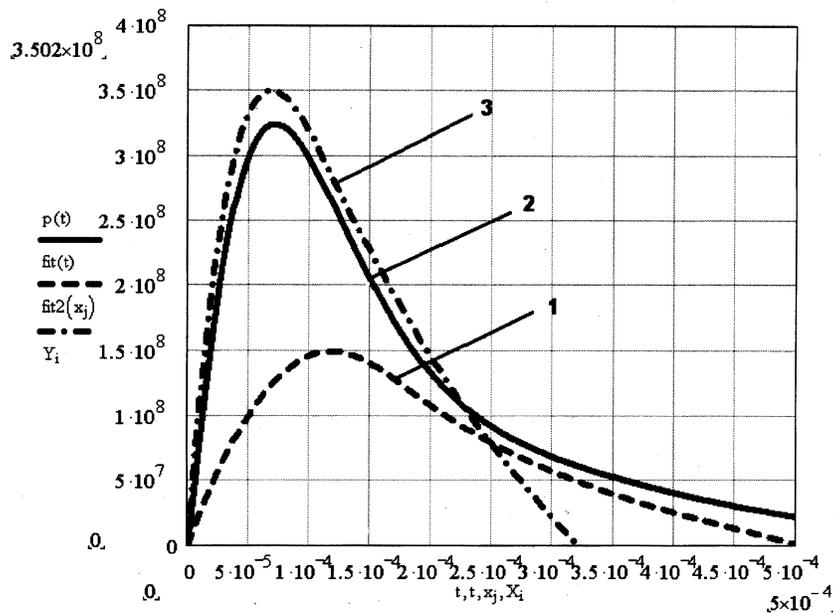
Уравнение состояния среды выбираем в форме Тэта [6]:

$$p = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right], \quad (9)$$

где коэффициент  $B = 3.045 \cdot 10^8$  Па;  $n = 7.15$ ;  $\rho$ ,  $\rho_0$  — плотности жидкости возбужденного и равновесного состояния и используем соотношение  $c^2 = \partial p / \partial \rho$ .

Далее, воспользовавшись выражением (8) и принимая во внимание (6) и (4), получаем уравнение результирующей ударно-акустической волны давления:

$$p(t) = 2at^b e^{ct} + \frac{4(b+ct)}{\rho_0 c_0^2} \left[ 1 + \frac{n(n-1)B}{2\rho_0 c_0^2} \right] a^2 t^{2b} e^{2ct}. \quad (10)$$



**Рис. 2.** Графическое изображение результирующей ударно-акустической волны давления от времени: 1 — экспериментальная кривая падающей волны; 2 — аналитическая и 3 — экспериментальные кривые взаимодействующих ударно-акустических волн.

В процессе экспериментов возбуждение волн производилось посредством электрического взрыва двух последовательно соединенных медных проволочек диаметром  $d = 1.2 \cdot 10^{-3}$  м, длиной  $l = 2.5$  см, которые располагались в цилиндрической взрывной камере соосно на расстоянии  $L = 30 \cdot 10^{-2}$  м друг от друга. Начальное напряжение на накопителе энергии составляло  $U_0 = 4.0 \cdot 10^3$  В.

Таким образом, рассматривая волну в виде (6), в работе получена временная зависимость результирующего давления взаимодействующих ударно-акустических волн с учетом влияния квадратичной поправки (рис. 2). Наблюдается достаточно хорошее согласование теоретической (2) и экспериментальной (3) кривых, и погрешность амплитуды относительно эксперимента не превышает  $\delta_1 = 8\%$ .

## Список литературы

- [1] *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наук. думка, 1986. 205 с.
- [2] *Бурцев В.А.* Электрический взрыв проводника и его применение. М.: Наука, 1990. 217 с.
- [3] *Суркаев А.Л., Кульков В.Г., Талызов Г.Н.* // ПЖТФ. 2001. Т. 27. В. 12. С. 6–9.
- [4] *Суркаев А.Л., Кульков В.Г., Талызов Г.Н.* // Неоднородные конструкции. Труды XXX Уральского семинара. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 91–96.
- [5] *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
- [6] *Яковлев Ю.С.* Гидродинамика взрыва. М.: Судпромгиз, 1961. 313 с.