

**О ПОГРЕШНОСТЯХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОДВОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ  
В ПРИБЛИЖЕНИИ КИРКВУДА — БЕТЕ**

В. В. Иванов

(Николаев)

Подводные электрические взрывы, используемые на практике, как правило, обладают цилиндрической симметрией, их длительность  $\sim 10^{-5}$  с, мощность  $10^7-10^9$  Вт [1]. При расчетах гидродинамических характеристик таких взрывов широкое применение получило приближение Кирквуда — Бете [2, 3]. Последнее не вытекает из уравнений гидродинамики и может быть оправдано хорошим совпадением с точными численными расчетами. Такое сравнение для цилиндрических подводных взрывов проведено в [4], но только для величины давления на фронте ударной волны.

Цель настоящих исследований — определение погрешностей, возникающих при расчетах гидродинамических параметров цилиндрических подводных электрических взрывов в приближении Кирквуда — Бете. Расчеты относятся к первому полупериоду тока, поскольку именно в этот момент формируется основная волна сжатия [2]. Величины погрешностей определялись путем сравнения с расчетами, выполненными методом характеристик [5, 6].

Числа Маха и расстояния выбраны характерными для подводных электрических взрывов, используемых в разрядно-импульсной технологии:  $M=0,2 \div 1$ ,  $r/a_0=1 \div 20$ , где  $r$  — пространственная координата;  $a_0$  — характеристический радиус, приближенно равный радиусу канала разряда к концу первого полупериода. Так, для рассматриваемого в дальнейшем разряда  $M=0,3$ ,  $a_0=0,045$  м при длительности разряда  $\tau=10^{-5}$  с.

В настоящей работе краевые условия на границе вода — плазма берутся, исходя из универсального, экспериментально установленного закона ввода электрической мощности в канал (1) и баланса энергии в канале разряда (2) [2]

$$N(t) = \frac{E_0}{\tau} \begin{cases} 4x, & 0 \leq x \leq 0,5, \\ 4(1-x), & 0,5 \leq x \leq 1, \\ 0, & 1 \leq x, \end{cases} \quad (1)$$

$$N(t) = dp_{\kappa} V / (\gamma - 1) + p_{\kappa} dV, \quad (2)$$

где  $N(t)$  — мощность, вводимая в канал;  $x=t/\tau$ ;  $E_0$  — энергия, введенная за время  $\tau$ ;  $p_{\kappa}$  — давление в канале;  $V$  — объем канала;  $\gamma$  — эффективный показатель адиабаты плазмы канала ( $\gamma=1,26$  [2]). Начальные условия при расчете двумя способами выбирались одинаковыми и таким образом, чтобы они мало сказывались на результатах интегрирования: начальный радиус  $a_n = (0,1 \div 0,5) \cdot 10^{-3}$  м, начальная скорость  $v_n = 25 \div 100$  м/с, начальное давление  $p_n = 3 \cdot (10^7 \div 10^8)$  Па. Эти величины соответствуют экспериментальным данным [2].

Результаты расчетов на ЭВМ БЭСМ-4М представлены на рис. 1—3. Время разряда принято  $10^{-5}$  с, плотность энергии на единицу длины  $44600$  Дж·м $^{-1}$ ,  $a_0 = 4,5 \cdot 10^{-2}$  м. Штриховыми линиями показаны результаты, полученные в приближении Кирквуда — Бете, сплошными — методом характеристик.

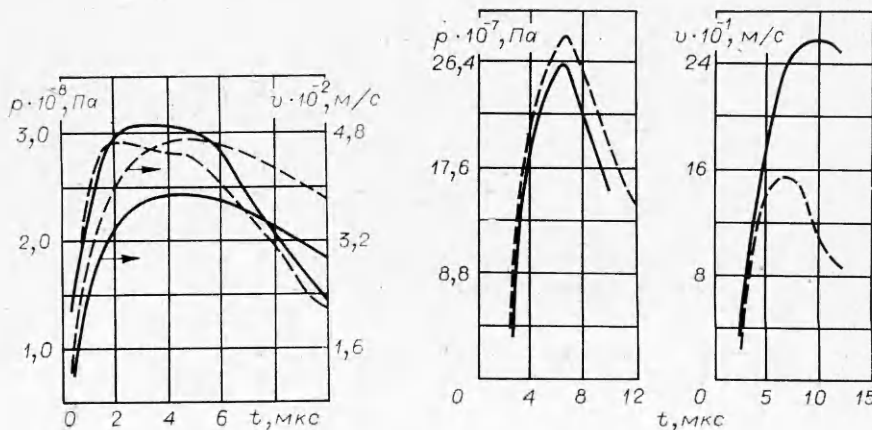


Рис. 1.

Рис. 2.

На рис. 1 даны результаты исследований непосредственно самого канала разряда. В этом случае кривые  $p(t)$  практически совпадают, однако в поведении скоростей заметно существенное различие. На рис. 2 показаны характеристики в непосредственной близости от канала разряда  $r/a_0=1$ . Расхождение в давлениях по-прежнему незначительные, а в гидродинамических скоростях они достигают 50%. Этот эффект с увеличением расстояния сглаживается. Примером этого могут служить данные рис. 3 для  $r/a_0=15$ . Аналогичная ситуация сохраняется во всем исследованном интервале  $M=0,2 \div 1$  и  $r/a_0=1 \div 20$ .

Итак, приближение Кирквуда — Бете при расчете профилей давлений и давлений в канале разряда дает погрешность, не превышающую 10%. При расчете гидродинамических скоростей стенки канала разряда погрешность может достигать 25%. Приближение Кирквуда — Бете дает неудовлетворительные результаты при расчете гидродинамических скоростей вблизи канала разряда.

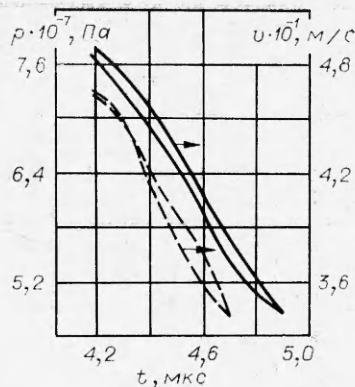


Рис. 3.

Поступила в редакцию  
24/VI 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Гульй, П. П. Малюшевский. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. Киев, Наукова думка, 1977.
2. К. А. Наугольных, Н. А. Рой. Электрические разряды в воде. М., Наука, 1971.
3. Р. Коул. Подводные взрывы. М., ИЛ, 1950.
4. В. К. Кедринский. ФГВ, 1972, 8, 1.
5. А. И. Жуков.— Тр. Мат. ин-та им. В. А. Стеклова, вып. 58, 1960.
6. А. В. Иванов.— Тр. Николаев. кораблестроит. ин-та, вып. 114, 1976.

### РЕАКЦИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ НА ВНУТРЕННЕЕ ВЗРЫВНОЕ ЛОКАЛЬНОЕ НАГРУЖЕНИЕ (СООБЩЕНИЕ II)

В. А. Могилев, А. Г. Иванов, Ю. А. Фатеев  
(Москва)

В [1] экспериментально выявлен ряд особенностей в деформировании тонкостенных стальных труб при внутреннем взрывном локальном нагружении и оценена масса продуктов взрыва (ПВ), воздействующих на их стенку. Основываясь на этих данных, найдем условие, при котором многократный подрыв цилиндрического заряда ВВ малой высоты (заряд в виде диска) в стальной трубе не вызывает остаточной деформации стенки последней, полагая, что разрушение трубы данного габарита происходит за пределом текучести. Для этого рассмотрим в обозначениях работы [1] одномерное деформирование стенки трубы по схеме рис. 1, а (для сравнения на рис. 1, б показан характерный профиль деформации, наблюдаемый в опытах), в которой приняты следующие допущения:

1) происходит мгновенное осевое инициирование заряда ВВ, обеспечивающее строго радиальное движение детонационной волны, так что масса  $m_R$  оценивается формулами (1), (2) из [1];

2) при подрыве заряда стенке мгновенно сообщается кинетическая энергия, которая равномерно распределена по массе кольца, участвующего в отборе энергии

Рис. 1. Деформация труб при локальном нагружении.

(а) — типичный профиль деформации стенки, регистрируемый в опытах;  $\bar{L} \sim (R_0 \delta)^{1/2}$ , 1 — нагрузка; б) упрощенная схема, 2 — заряд.

