

значения, что удовлетворяет предъявленным требованиям. О давлении паров щелочного металла в полости катода можно судить лишь косвенно, сопоставляя параметры системы, работающей на соли, с системой, работающей на чистом металле. Такая оценка показала, что давление находится на уровне 13 Па и слабо зависит от температуры катода. Полученный стабильный расход может быть объяснен стабильностью подвода энергии в зону разложения соли, а эта энергия осуществляет разрыв определенного количества связей.

Таким образом, проведенные исследования параметров полых катодов ампульного типа показали, что в качестве рабочих тел следует использовать соли щелочных металлов, химически пассивные к атмосфере воздуха, температура разложения которых не превышает эмиссионную температуру катода, и обеспечивают стабильный расход щелочного металла при разложении.

1. Гвердцители И. Г., Каландарашвили А. Г., Чилингариашвили П. Д. и др. Исследование процесса расширения пиролити-

- ческого графита при насыщении парами цезия // ЖТХ.—1975.—49, № 1.—С. 217—218.  
2. Дородной А. М. Анализ и исследование катодных процессов в сильноочном дуговом разряде // Плазм. ускорители: Сб. науч. тр. — М.: Машиностроение, 1972.—С. 157—179.  
3. Жуков М. Ф., Козлов Н. П., Пустогаров А. В. и др. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах. — Новосибирск: Наука, 1982.—158 с.  
4. Краткий справочник по химии. Справочник / Под. ред. А. Т. Пилиленко. — Киев: Наук. думка, 1987.—830 с.  
5. Приданцев В. Ф. Методика оценки параметров полых катодов // Пробл. высокотемператур. техники: Сб. науч. ст. — Днепропетровск: ДГУ, 1979.—С. 119—127.

#### WORKING BODIES OF THE TWO-STEP CATHODE-EQUALISER OF ELECTRIC ROCKET ENGINE

A. V. Hytko, F. A. Chmilenko

The salts of alkaline metals which are chemically passive to the air atmosphere, for example, carbonates, are proposed to be used as working bodies. The temperature of the decomposition of carbonates does not exceed the emission temperature of the cathode, which provides the stable charge of an alkaline metal.

УДК 534.222

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН В ГРУНТЕ

© Е. В. Воротинцев, Г. И. Сокол

Дніпропетровський національний університет

Розглянуто ударну хвилю від вибуху у ґрунті. Складено математичну модель якісної картини поширення вибуху у ґрунті та розраховано параметри імпульсу від вибуху на різних відстанях від епіцентру. Форма імпульсу описується рівнянням Бюргерса.

Взрыв является одним из самых распространенных источником мощных звуковых колебаний. Интенсивные звуковые волны, порождаемые взрывом, качественно отличаются от малоамплитудных возмущений, описываемых линейной акустикой. При распространении интенсивной волны происходит постепенное изменение формы волны вследствие разницы в скоростях движения различных участков ее профиля. Точки, отвечающие большему сжатию, движутся быстрее, в результате крутизна фронтов сжатия растет, и возникают ударные волны. Периодические волны трансформируются в волны с пилообразным профилем, а одиночные импульсы — в возмущения треугольной формы [1—6].

Целью настоящей работы является составление математической модели качественной картины распространения взрыва в грунте и расчет параметров

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ. ДОДАТОК.—2003.—9, № 1

импульса от взрыва на различных расстояниях от эпицентра.

Ударная волна детонации из взрывчатого вещества переходит в грунт, распространяясь в ней в виде сферического фронта. Вслед за ней возбуждается более слабая переменная волна, связанная с пульсациями газового пузыря, образованного продуктами детонации. Авторами рассматривается только головная волна, имеющая форму импульса с разрывным передним фронтом и пологим задним, близким к экспоненциальному. Более слабая волна не рассматривается вследствие несильного ее влияния.

Форма импульса описывается уравнением Бюргерса — основополагающим для нелинейной акустики, применимым при описании распространения интенсивных звуковых волн в газах, жидкостях и

твердых средах:

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \alpha v \frac{\partial v}{\partial y} = \delta \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}, \quad (1)$$

где:  $v$  — амплитуда возмущения скорости, давления или скорость сдвиговых деформаций, исходя из конкретного случая),  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\beta$  — коэффициенты нелинейности, диссипации и дисперсии соответственно (фактически определяются исходя из того, что собой представляет амплитуда возмущения),  $x$  — координата,  $y = t - x/c_0$  — бегущая координата,  $t$  — время,  $c_0$  — скорость звука.

Авторами предлагается математическая модель, описывающая на основе уравнений нелинейной акустики поведение мощного импульса от взрыва в грунте. Грунт представлен моделью сплошной среды, а распространение в нем акустических импульсов описывается на основе уравнения Бюргерса.

В результате решения уравнения (1) с учетом сделанных предположений получены следующие зависимости амплитуды  $v_0$  и длины импульса  $l$  на различных расстояниях от места взрыва:

$$v = \frac{v_0 r_0}{r \sqrt{1 + \sigma_0 \ln r / r_0}}, \quad (2)$$

$$l = l_0 \sqrt{1 + \sigma_0 \ln r / r_0}, \quad (3)$$

$$\sigma_0 = \frac{\varepsilon v_0 r_0}{l_0 c_0}. \quad (4)$$

Формулы (2) — (4) позволяют рассчитать для одиночного сферического импульса его параметры на различных расстояниях от места возникновения. Но для проведения расчета необходимо знать возмущение и длительность импульса в начальной точке.

Также одной из важных характеристик импульса на различных расстояниях является время его длительности:

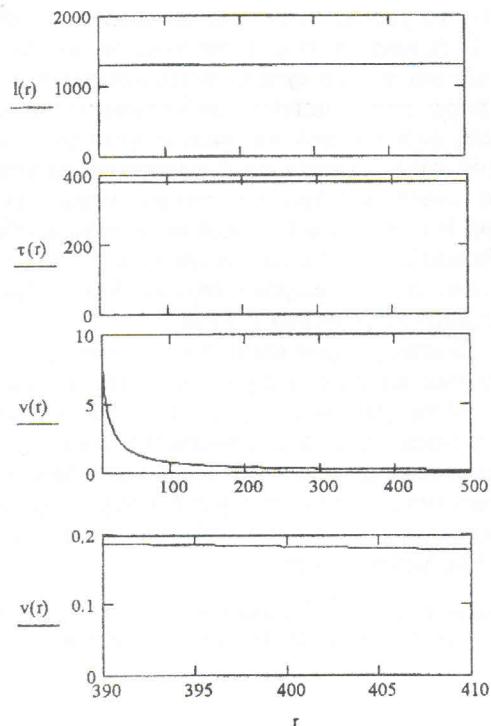
$$\tau = \frac{\tau_0}{e} [1 + (e - 1) \sqrt{1 + 2 \sigma_0 \ln r / r_0}]. \quad (5)$$

Величины начальной длительности импульса и его амплитуды можно определить по следующим эмпирическим формулам в зависимости веса заряда  $Q$ :

$$v_0 = G_1 (Q^{1/3} / r_0)^{1.13}, \quad (6)$$

$$\tau_0 = G_2 Q^{1/3} (Q^{1/3} / r_0)^{-0.22}. \quad (7)$$

Численные коэффициенты  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $\varepsilon$ , в приведенных формулах определены из усреднения экспериментальных данных и приняты различными у раз-



Графики параметров импульса взрыва на различных расстояниях от эпицентра

ных исследователей. В среднем можно принять  $G_1 = 11$ ,  $G_2 = 50$ ,  $\varepsilon = 5$  (при этом  $Q$  выражается в кг,  $v_0$  — в см/с,  $r_0$  — в м,  $\tau_0$  — в мкс).

Исходными данными для определения амплитуды возмущения, длины и длительности импульса в зависимости от расстояния является вес заряда  $Q$ .

Авторами проведен теоретический расчет параметров импульса от взрыва с весом заряда 340 кг на различных расстояниях от эпицентра взрыва и сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных, полученных в г. Первомайске при взрыве ракетных шахт. Получены следующие экспериментальные данные:

- мощность взрывного заряда 340 кг,
- амплитуда возмущения (скорость сдвига) на расстоянии 400 м — 0.16 см/с,
- длительность импульса на расстоянии 400 м — 452 мс.

В результате теоретического расчета на основе вышеприведенных соотношений получены следующие значения:

- мощность взрывного заряда 340 кг,
- амплитуда возмущения (скорость сдвига) на расстоянии 400 м — 0.183 см/с,

— длительность импульса на расстоянии 400 м — 378 мс.

Данные расчета представлены на рисунке.

При определении амплитуды возмущения расхождение расчетных и экспериментальных данных составило 14.5 %, а при определении длительности импульса — 15.5 %.

Возникшее расхождение можно объяснить следующими факторами:

— данная теория не учитывает скорости детонации взрыва, а начальные параметры принимаются на основе усредненных эмпирических зависимостей,

— теория носит несколько упрощенный характер по сравнению с реальной физической картиной распространения импульса, так как грунт принял сплошной средой.

## Выводы

1. Предложена математическая модель, которая на основе нелинейной акустики описывает поведение мощного акустического импульса от взрыва в грунте. Показана возможность представления грунта моделью сплошной среды и описано поведение в нем акустических импульсов на основе уравнения Бюргерса.

2. Проведен расчет параметров импульса от взрыва с весом заряда 340 кг на различных рассто-

яниях от эпицентра взрыва.

3. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных показал, что предложенная математическая модель дает результаты достаточно близкие к эксперименту.

1. Зарембо Л. К. Введение в нелинейную акустику. — М.: Наука, 1966.—519 с.
2. Ландау Л. Д. Об ударных волнах на далеких расстояниях от места их возникновения // ПММ.—1945.—9, вып. 3.—С. 286—292.
3. Наугольных К. А. О переходе ударной волны в акустическую // Акустический журнал.—1972.—18, вып. 4.—С. 579—583.
4. Пелиновский Е. Н., Фридман В. Е., Энгельбрехт Ю. Нелинейные эволюционные уравнения. — Таллин: Валгус, 1984. 154 с.
5. Руденко О. В., Солуян С. И. Теоретические основы нелинейной акустики. — М.: Наука, 1975.—287 с.
6. Терстон Р. Распространение волн в жидкостях и твердых телах // Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона.—М.: Мир, 1966.—Т. 1.—С. 13—139.

## MATHEMATICAL MODELLING THE PROPAGATION OF SHOCK WAVES FROM EXPLOSION IN GROUND

E. Vorotynsev, G. Sokol

The shock wave form an explosion in ground is considered. We developed a mathematical model of the qualitative picture of the propagation of an explosion in ground and calculated parameters of the impulse from the explosion at various distances from the epicenter. The impulse shape is described by the Burgers equation.