

К. К. КРУПНИКОВ, В. Ф. КУРОПАТЕНКО, А. Т. САПОЖНИКОВ,
Б. Н. СИМАНОВ, В. А. СИМОНЕНКО

РАСЧЕТ ВЗРЫВОВ В СРЕДАХ С ПОЛИМОРФНЫМИ ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

(Представлено академиком Е. И. Забазинным 8 XII 1970)

При сильных взрывах в плотных средах (металлы, горные породы и др.) происходит сжатие вещества, сопровождающееся зачастую полиморфными фазовыми переходами, которые влияют на параметры ударных волн и распределения давления, скорости, плотности, температуры и других характеристик среды. Описание этих явлений затруднено инерционностью переходов, однако в простейшем приближении термодинамического равновесия задачу удается решить до конца. Ограничимся рассмотрением сильного взрыва в среде, имеющей лишь две модификации.

Уравнение состояния каждой фазы берется в виде

$$P = P_x(\rho) + P_T, \quad E = E_x(\rho) + E_T,$$

$$P_x = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} (\delta^n - 1),$$

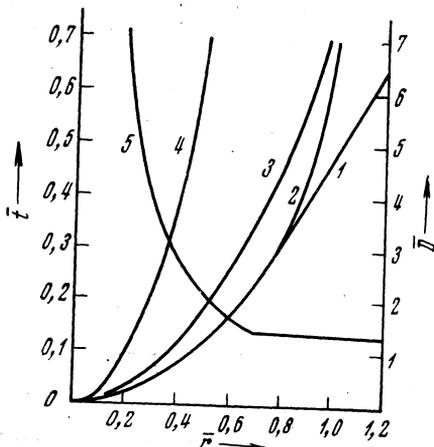
$$P_T = \Gamma c_V \rho T, \quad (1)$$

$$E_x = \frac{c_0^2}{n} \left[\frac{\delta^{n-1} - n}{n-1} + \frac{1}{\delta} \right] + E_0,$$

$$E_T = c_V T,$$

где $\delta = \rho / \rho_0$, $c_V = \text{const}$, $E_0 = \text{const}$, $\Gamma = \text{const}$. Константы, входящие в уравнение состояния, получаются либо из теоретических моделей, либо из опытов. Границы областей стабильности фаз определяются

Рис. 1. Траектории ударных волн: 1 — первой, 2 — второй, возникшей после раздвоения первой волны, 3 — ударной волны разрежения, 4 — границы газового пузырька



из равенства химических потенциалов. В расчетах давление и внутренняя энергия в каждой фазе в областях непрерывного течения находятся из системы уравнений

$$dE + P dV = 0, \quad (2)$$

$$P = P_x(\rho) + \Gamma \rho (E - E_x). \quad (3)$$

Уравнение состояния смеси следует из соотношения

$$(\partial E / \partial V)_T = T(\partial P / \partial T)_V - P,$$

которое после интегрирования по V вдоль изотермы, являющейся здесь и изобарой, принимает вид

$$E - E_* = [T dP(T) / dT - P(T)] (V - V_*). \quad (4)$$

Кривая равновесия $P = P(T)$ вместе с (4) дает связь между P , V и E .

Здесь V_* , E_* — соответственно удельный объем и внутренняя энергия одной из фаз вдоль кривой равновесия.

На границах области смеси фаз изэнтропы и ударные адиабаты претерпевают излом, приводящий в ряде случаев к появлению ударных волн разрежения и к раздвоению ударных волн сжатия. Все эти особенности были учтены в программе РАНД (расчет адиабатических нестационарных дви-

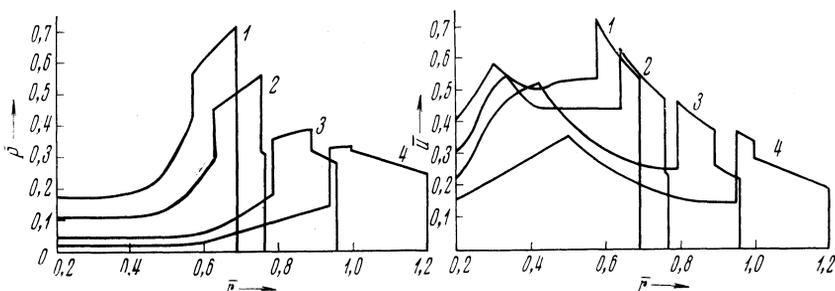


Рис. 2. Зависимость безразмерных давления \bar{P} и скорости \bar{u} от времени: 1 — до раздвоения первой ударной волны, 2, 3, 4 — после раздвоения

жений), по которой на ЭВМ рассчитан взрыв в среде, похожей на кварц с переходом в стипшовит:

$$\rho_{01} / \rho_{02} = 0,605, \quad c_{01} / c_{02} = 0,443, \quad c_{v1} / c_{v2} = 1, \\ n_1 = 4, \quad n_2 = 2,7, \quad \Gamma_1 = \Gamma_2 = 0,55.$$

Обе фазы считались жидкими (без напряжений сдвига), в центре помещался газовый пузырек с высоким давлением, расширение которого имитировало точечный взрыв.

На рис. 1 в безразмерных переменных $\bar{r} = r / r_g$, $\bar{t} = c_0 t / r_g$, где $r_g = [Q / (\rho_0 c_0^2)]^{1/3}$, изображены траектории ударных волн. Скачок разрежения появился в начальный момент, что объясняется применением идеализированного уравнения состояния, в котором отсутствует тройная точка.

На рис. 2 приведено распределение безразмерного давления $\bar{P} = P / (\rho_0 c_0^2)$ и безразмерной скорости $\bar{u} = u / c_0$ во времени. Видно, что за фронтом первой ударной волны происходит заметное увеличение как давления, так и скорости, которые затем скачком спадают на фронте ударной волны разрежения. После раздвоения скорость первой ударной волны меняется очень медленно.

Расчеты доведены до момента, когда на первой ударной волне начинает сказываться твердость среды (сопротивление сдвигу).

Поступило
26 X 1970