

фронте УВ, зафиксированное в опытах, составило 34 кбар. Эта экспериментальная точка, соответствующая времени действия давления 7 мкс, должна лежать на кривой  $p_{\text{фр}} = f(\tau)$ , разделяющей, как отмечалось выше, область частичной и полной детонации ВВ. Таким образом, интервал давлений, в котором при  $\tau = 7$  мкс происходит частичная детонация ТГ 50/50, составляет 22 кбар.

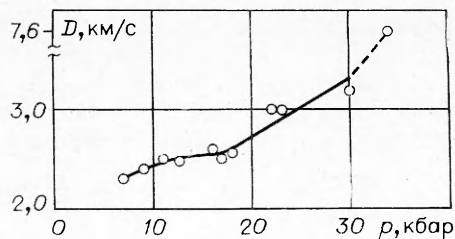


Рис. 2. Зависимость средней скорости распространения ударной волны в составе ТГ 50/50 от амплитуды давления на фронте УВ.

На рис. 2 приведена зависимость средней скорости распространения УВ ( $D$ ) в ВВ на участке  $h = 4 \div 8$  мм от амплитуды давления на фронте УВ. Отметим область практически постоянной скорости ( $D = 2,5$  км/с) в интервале  $p_{\text{фр}} = 10 \div 14$  кбар. Аналогичный участок постоянной скорости отмечен при исследовании режима низкоскоростной детонации в твердых ВВ [9].

Таким образом, экспериментально показано, что для указанных в работе условий испытаний при давлениях на фронте ударной волны от 12 до 30 кбар в образце из состава ТГ 50/50 распространяется нестационарная система: УВ и следующая за ней область взрывчатого превращения. При  $p > 30$  кбар эта система переходит в нормальную детонационную волну.

Поступила в редакцию  
21/IX 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М., «Наука», 1968.
2. А. Н. Дремин, С. Д. Савров. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
3. К. Юхансон, П. Персон. Детонация взрывчатых веществ. М., «Мир», 1973.
4. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов, К. К. Шведов. ПМТФ, 1963, 6, 131.
5. Г. И. Канель. ФГВ, 1978, 14, 1.
6. Y. de Longueville, C. Fauquignon, H. Moulard. Sixth Symposium (Internation.) on Detonation. San Diego, California, 1976.
7. А. П. Погорелов, Б. Л. Глушак и др. ФГВ, 1977, 13, 2.
8. Ю. Б. Батюков, Е. Д. Вишневецкий. Тез. докл. II Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., ВНИИФТРИ, 1976.
9. А. А. Сулимов, А. В. Обменин.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.

#### ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВАХ ЗАРЯДОВ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

В. Л. Лавриненко, Б. В. Левин, И. П. Сумин  
(Новоалександровск)

Приведены результаты кинорегистрации параметров купола и поверхностных волн в водоеме при взрыве смонтированных из детонирующего шнура зарядов тэна массой до 5,5 кг, имеющих сферическую, цилиндрическую (длина до 16 м) и плоскую форму (площадь заряда до 96 м<sup>2</sup>). Выполнение исследований связано с изучением поверхностных

эффектов при производстве дноуглубительных взрывных работ на акваториях портов и водохранилищ.

1. При взрыве в безграничной жидкости для максимального давления  $p$  и интегральной плотности потока энергии  $\epsilon_{УВ}$  сферической ударной волны справедливы формулы [1, 2]

$$p = k(Q^{1/3}/R)^\beta, \quad (1)$$

$$\epsilon_{УВ} = \rho c \int_0^\tau u^2 dt = \frac{1}{\rho c} \int_0^\tau p^2 dt, \quad (2)$$

где  $Q$  — масса заряда;  $R$  — расстояние от заряда;  $u$  — массовая скорость за фронтом;  $\rho c$  — акустическое сопротивление воды;  $\tau$  — время действия ударной волны;  $k, \beta$  — числовые коэффициенты.

При выходе ударной волны (УВ) на поверхность водоема скорость развития купола  $u_k$  [1] определяется выражением

$$u_k = 2p \sin \alpha / \rho c, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — угол между вертикалью и плоскостью волны.

Согласно экспериментальным данным [3, 4] и численным расчетам [5], скорость купола зависит в основном от величины  $Q, R$ , или в соответствии с (1) — (3) может описываться функцией вида

$$u_k = \varphi(\epsilon_{УВ}), \quad (4)$$

что согласуется с выводами [6], согласно которым определяющим параметром взрыва является не энергия, а импульс, передаваемый среде.

Смещение поверхности воды под действием сферической УВ от подводного взрыва рассматривалось в [7] для начальной стадии процесса, а описание поверхностных эффектов от взрыва плоского и цилиндрического (шнурового) зарядов в литературных источниках отсутствует. Для исследования эффекта от взрыва зарядов различной формы проведен ряд опытных взрывов в открытом водоеме.

2. Опыты проводились в водоеме площадью  $200 \times 60$  м<sup>2</sup> и глубиной до 8 м. Источником взрыва служил тэновый детонирующий шнур (ДШ). Масса ВВ на единицу длины шнура составляла 13 г/м, теплота взрыва — 1400 ккал/кг, скорость детонации — 7 км/с.

Для надводного монтажа заряда из ДШ и погружения его на заданную глубину создана специальная тросовая система с трапециями наподобие подвешенного моста. Плоский заряд монтировался из отрезков ДШ длиной до 16 м, которые укладывались на трапеции с интервалом 0,25 м. При максимальной ширине заряда 6 м (25 отрезков ДШ) его площадь составляла 96 м<sup>2</sup>. С помощью тросовой системы смонтированный заряд размещался в водоеме на глубине до 2,5 м параллельно поверхности воды. Ошибка за счет непараллельности и неплоскостности заряда не превышала 4%. Шнуровой (длиной 16 м) и сферический заряды монтировались с помощью этой же системы.

Регистрация развития купола и поверхностных волн производилась тремя 35-миллиметровыми кинокамерами «Конвас», 16-миллиметровыми кинокамерами «Пентафлекс» и «Киев» со скоростями съемки от 25 до 64 кадр/с. Кодирование информации с кинограмм проводилось вручную, а обработка данных — на ЭВМ «Минск-22».

Основные результаты, приведенные в таблице, получены на материале двух серий взрывов при глубине погружения заряда 2,5 м: а) опыты с фиксированной массой заряда (5,42 кг тэна) различной геометрии (плоский, шнуровой и сферический заряды); б) опыты с

Результаты подводных взрывов

Конструкция заряда	Индекс опыта	Масса заряда, кг	Глубина, м	Размеры заряда, м			Плотность распределения заряда, кг/м <sup>3</sup>	Расстояние от заряда до точки взр., м	Суммарная плотность потока энергии, 10 <sup>9</sup> Дж/м <sup>2</sup>	Измеренная высота купола H (м) для моментов времени t (с)						Расчетное макс. время подъема купола, с	Расчетная макс. высота подъема купола, м	Измеренная макс. скорость купола, м/с
				Длина	Ширина	Диаметр (толщина)				0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30			
Плоский	П <sub>1</sub>	1,99	2,5	16	2	0,006	0,06	2,5	1,7	1,7	3,5	5,0	6,4	—	—	1,8	22,3	36
	П <sub>2</sub>	2,87	2,5	16	3	0,006	0,06	2,5	1,7	2,2	4,0	5,5	6,9	8,3	—	1,8	22,5	36
	П <sub>3</sub>	3,76	2,5	16	4	0,006	0,06	2,5	1,7	1,4	3,4	5,1	6,6	—	—	1,4	16,4	40
	П <sub>4</sub>	5,42	2,5	16	6	0,006	0,06	2,5	1,7	1,7	3,6	5,2	6,5	—	—	1,2	13,7	38
	П <sub>5</sub>	4,23	2,5	16	6	0,006	0,06	2,5	1,7	1,8	3,7	5,5	7,0	—	—	—	—	38
	П <sub>6</sub>	5,42	2,5	16	3	0,006	0,12	2,5	3,4	2,0	4,0	5,6	7,4	—	—	—	—	40
Сферический	С <sub>1</sub>	5,42	2,5	—	—	0,4	—	2,55	3,8	2,6	4,8	6,7	8,3	9,6	10,6	1,7	22,7	44
	С <sub>2</sub>	5,42	2,5	—	—	0,4	—	2,8	2,9	2,4	4,2	5,7	7,2	8,1	9,1	1,7	20,1	35
	С <sub>3</sub>	5,42	2,5	—	—	0,4	—	3,1	2,1	1,7	3,3	5,0	6,3	7,4	8,6	1,8	21,5	32
	С <sub>4</sub>	5,42	2,5	—	—	0,4	—	3,8	1,2	1,3	2,65	4,0	5,0	6,1	7,1	1,5	14,8	27
	С <sub>5</sub>	5,42	2,5	—	—	0,4	—	4,5	0,7	0,9	2,15	3,4	4,2	4,9	5,8	1,1	9,2	25
	С <sub>6</sub>	5,42	2,5	—	—	0,4	—	7,2	0,17	0,2	0,4	0,5	0,6	0,63	0,68	—	—	4
Шнуровой	Ш <sub>1</sub>	5,42	2,5	16	—	0,05	0,34*	2,5	1,27	1,2	2,5	3,8	5,0	5,9	—	1,3	13,1	26

\* В килограммах на погонный метр

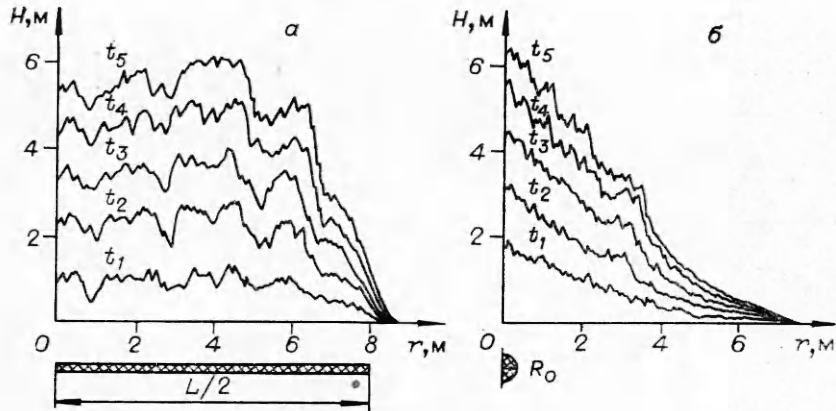


Рис. 1.

фиксированной плотностью распределения плоского заряда  $0.06 \text{ кг/м}^2$  при различной ширине заряда ( $W=2, 3, 4, \text{ и } 6 \text{ м}$ ).

Образцы совмещенных профилей куполов по кинограммам взрывов плоского (а) и сферического (б) зарядов приведены на рис. 1.

3. Ниже все величины, отмеченные сверху чертой, отнесены к условному радиусу заряда  $R_0=Q^{1/3}$ , где  $Q$  — масса заряда, кг. Экспериментальные зависимости высоты купола  $\bar{H}$  от времени в ранней стадии его развития ( $30 < t \leq 300 \text{ мс}$ ) при взрыве зарядов разной формы даны на рис. 2. Сплошными линиями изображены результаты замеров в центральной ( $r=0$ ) и периферической ( $r=3,7 \text{ м}$ ) частях купола при сферическом взрыве (кривые 2, 7), максимальные высоты купола в опытах  $\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$  с плоскими зарядами (кривые 3, 4, 5) и при взрыве шнурового заряда (кривая 6). Здесь  $r$  обозначает расстояние по поверхности от вертикальной плоскости симметрии заряда до точки измерения. Для сравнения приведены экспериментальные данные [3, 4] по взрывам сферических зарядов массой  $100 \text{ кг}$  и  $0,256 \text{ г}$  (кривые 1, 8). Штриховыми линиями показаны значения высоты купола, рассчитанные методом экстраполяции до  $H=H_{\text{max}}$ . Зависимости высоты и скорости подъема купола от времени  $H(t)$  и  $u_r(t)$  для различных взрывов приведены на рис. 3. Отметим, что максимальные значения скоростей для сферического и шнурового зарядов, полученные путем линейной экстраполяции измеренных значений и равные  $53$  и  $34 \text{ м/с}$ , всего на  $5\text{--}13\%$

отличаются от расчетных значений по данным [1, 8].

Полученные в экспериментах значения  $u_r$  коррелируют с величиной суммарной плотности потока энергии взрыва, которая для зарядов различной геометрии определялась по формулам

$$\varepsilon_{\text{сф}} = E \sin \alpha / 4\pi R^2,$$

$$\varepsilon_{\text{шн}} = E \sin \alpha / 2\pi R (L + R).$$

$$\varepsilon_{\text{пл}} = E / 2LW [1 + (L+W) / LW \cdot \Delta], \quad (5)$$

где  $L, W, \Delta$  — длина, ширина и толщина заряда;  $E$  — энергия заряда;  $R$  — расстояние от заряда до точки измерения ( $R = \sqrt{r^2 + H^2}$ ).

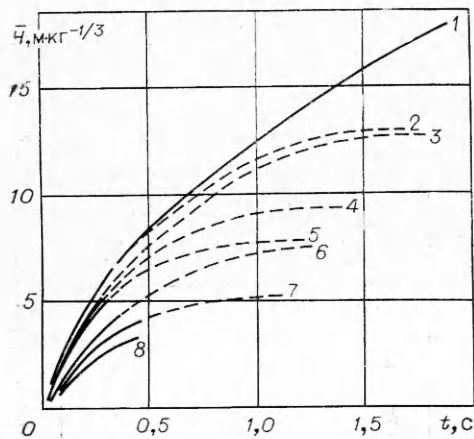


Рис. 2.

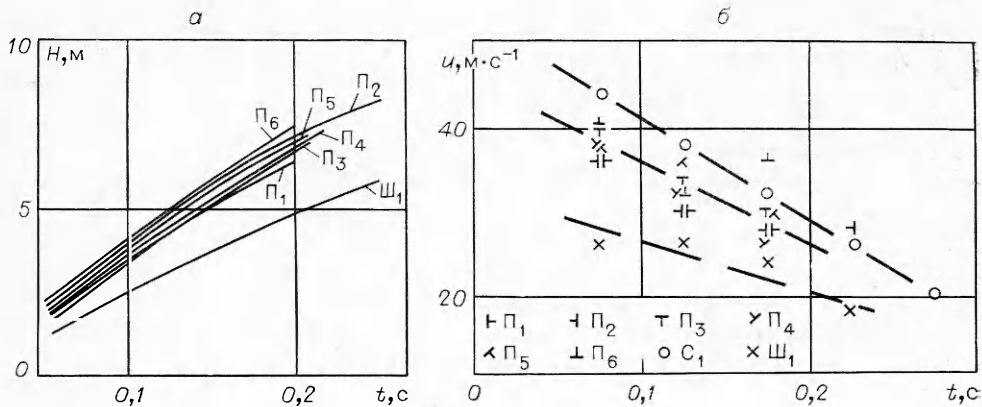


Рис. 3.

Общая для зарядов различной формы зависимость вида (4) описывается эмпирической формулой (рис. 4, 1)

$$u_{\text{к}} = 7,5 \cdot 10^{-2} (\varepsilon - \varepsilon_0)^{1/2}. \quad (6)$$

На рис. 4, 2 показана теоретическая зависимость  $u_{\text{к}}(\varepsilon)$ , вычисленная для сферического заряда согласно модели Кирквуда—Бете [1]. В полученной эмпирической зависимости (6) величина  $\varepsilon_0$ , равная примерно  $10^4 \text{ Дж/м}^2$ , представляет собой, согласно [2], энергию кавитации или минимальную энергию, вызывающую откол поверхности воды. Часть энергии, соответствующая  $(\varepsilon - \varepsilon_0)$ , идет на движение купола.

4. При регистрации поверхностных волн, вызываемых взрывом, отмечено, что каждый из взрывов генерирует цуг короткопериодных волн, характеризующихся длинами порядка  $\lambda = 1 \div 3 \text{ м}$ . Взрывы шнурового и плоского зарядов формируют волны с плоским фронтом в отличие от волн с кольцеобразным фронтом, вызываемом взрывом сферического заряда. При плоских взрывах отмечено возникновение передовой высокоскоростной волны с периодом 3,2 с и амплитудой 0,1—0,2 м, которая уверенно регистрировалась на расстоянии 11—19 м от купола. Скорость распространения этой волны  $c = 5 \text{ м/с}$  соответствует теоретическому значению фазовой скорости гравитационных волн, вычисленному по формуле  $c = \sqrt{g\lambda/2\pi} \cdot \text{th}(2\pi h/\lambda)$  для средней глубины бассейна  $h = 3,5 \text{ м}$  на трассе распространения волн.

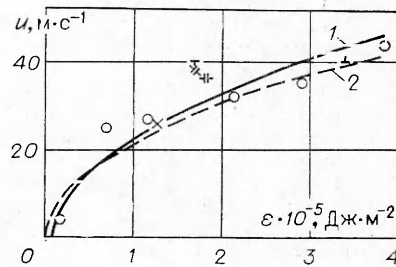


Рис. 4.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Коул. Подводные взрывы. М., ИЛ, 1950.
2. Ф. А. Баум, А. П. Орленко и др.— В сб.: Физика взрыва. М., «Наука», 1975.
3. Л. С. Козаченко, Б. Д. Христофоров. ФГВ, 1972, 8, 3.
4. В. Л. Заонегин, Л. С. Козаченко, В. Н. Костюченко. ПМТФ, 1960, 2.
5. W. F. Ballhaus, M. Holt. Phys. Fluids., 1974, 17, 6.
6. М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М., «Наука», 1977.
7. Б. Д. Фристофоров. ПМТФ, 1961, 1.
8. В. К. Кедринский. ФГВ, 1972, 8, 1.