

## О ПОДОБИИ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВЕ СФЕРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В ВОДЕ И В ВОЗДУХЕ

Б. Д. Христофоров

(Москва)

Анализ опубликованных экспериментальных данных [1-3] полученных при взрывах сферических зарядов в воде и в воздухе, показывает, что в отличие от случая взрыва в воздухе все параметры ударной волны в воде зависят от плотности взрывчатых веществ (ВВ); при этом оказывается, что критерии энергетического подобия не выполняются.

Ниже приводятся результаты определения эмпирических законов подобия при взрыве в воде и в воздухе.

### Обозначения

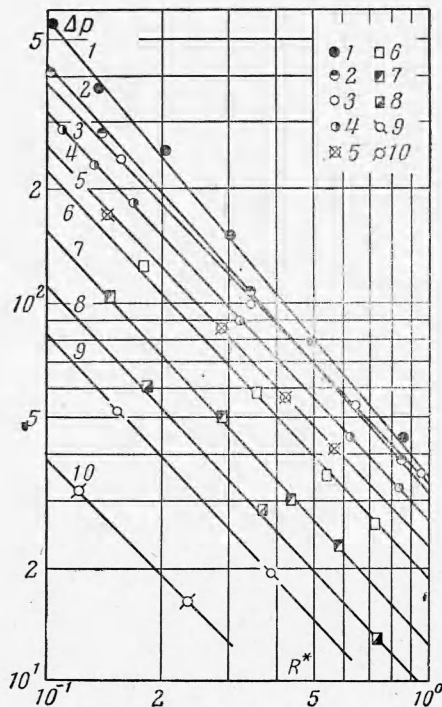
<p><math>R</math> — расстояние до центра взрыва, м;  <math>R_0</math> — радиус источника взрыва, м;  <math>r</math> — относительное расстояние до центра взрыва;  <math>c</math> — масса (ВВ), кг;  <math>Q</math> — удельная теплота взрыва, ккал/кг;  <math>cQ</math> — энергия взрыва, ккал;</p>	<p><math>a</math> — скорость звука в среде; м/сек;  <math>\rho</math> — плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  <math>\rho_0</math> — плотность ВВ, кг/м<sup>3</sup>;  <math>\Delta p</math> — максимальное давление, атм;  <math>I</math> — удельный импульс, кгсек/м<sup>2</sup>;  <math>\tau</math> — время действия ударной волны, сек;  <math>n</math> — показатель политропы воды.</p>
---	--

Если при взрыве какого-либо ВВ параметры его детонации не зависят от размера заряда и не происходит догорания продуктов, то имеет место закон геометрического

подобия, согласно которому параметры ударной волны являются функциями относительного расстояния  $r = R/R_0$  от источника

$$\frac{\Delta p}{\rho a^2} = f(r), \quad \frac{I}{R_0 \rho a} = \psi(r), \quad \frac{\tau a}{R_0} = \varphi(r) \quad (r \geq 1) \quad (1)$$

Формулы (1) следуют из уравнений гидродинамики и подтверждаются опытом [1-4].



Фиг. 1. Зависимость максимального давления ударной волны  $\Delta p$  кг/см<sup>2</sup> от приведенного расстояния  $R^* = R/\sqrt{cQ/\rho_0}$

при подводном взрыве: 1 — тэн,  $\rho_0 = 1600$  кг/м<sup>3</sup>,  $Q = 1400$  ккал/кг; 2 — тэн,  $\rho_0 = 400$  кг/м<sup>3</sup>,  $Q = 1400$  ккал/кг; 3 — азид свинца,  $\rho_0 = 1600$  кг/м<sup>3</sup>,  $Q = 365$  ккал/кг; 4 — азид свинца,  $\rho_0 = 850$  кг/м<sup>3</sup>,  $Q = 365$  ккал/кг; 5 — 10 — взрывы зарядов тэна,  $\rho_0 = 1600$  кг/м<sup>3</sup> в полостях с воздухом, соответственно:  
 5 — ( $R_0 = 1.85$  см,  $cQ = 1.17$  ккал)  
 6 — ( $R_0 = 1.85$  см,  $cQ = 0.59$  ккал)  
 7 — ( $R_0 = 4.17$  см,  $cQ = 1.12$  ккал)  
 8 — ( $R_0 = 4.37$  см,  $cQ = 0.56$  ккал)  
 9 — ( $R_0 = 8$  см,  $cQ = 1.12$  ккал)  
 10 — ( $R_0 = 12$  см,  $cQ = 1.12$  ккал)

В практике нашел широкое применение закон энергетического подобия, впервые полученный М. А. Садовским из анализа экспериментальных данных о параметрах ударной волны при взрыве различных ВВ в воздухе

$$\frac{\Delta p}{\rho a^2} = f_1(R^*/R), \quad \frac{I}{\rho a R^*} = \psi_1(R^*/R), \quad \frac{\tau a}{R^*} = \varphi_1(R^*/R) \quad (R^* = \sqrt[3]{cQ/\rho a^2}, \quad r > 15) \quad (2)$$

Согласно формулам (2), параметры ударной волны являются функциями лишь одной безразмерной переменной  $R^*/R$  и не зависят от размера источника взрыва и плотности заряжания.

М. А. Садовским было отмечено [4], что закон энергетического подобия при малых скоростях  $v$  выделения энергии в источнике взрыва может не выполняться, однако, зависимость параметров ударной волны от величины  $v$  им не изучалась.

Исследование параметров фронта ударной волны в воздухе при взрыве зарядов из тэна и азида свинца разной плотности показало [2], что закон энергетического подобия при взрыве этих ВВ выполняется. Скорость  $v$  выделения энергии в источнике взрыва в указанных опытах изменялась в пределах  $1.67 \div 0.256$  ккал / мсек, что охватывает все возможные значения  $v$  у любых известных твердых и жидких ВВ.

При подводном взрыве ВВ закон энергетического подобия не выполняется [1, 3]. Параметры ударной волны зависят от плотности и теплоты взрыва ВВ. Для иллюстрации на фиг. 1 и 2 построены графики зависимостей

$$\Delta p = f(R^*), \quad I^* = \varphi_1^2(R^*)$$

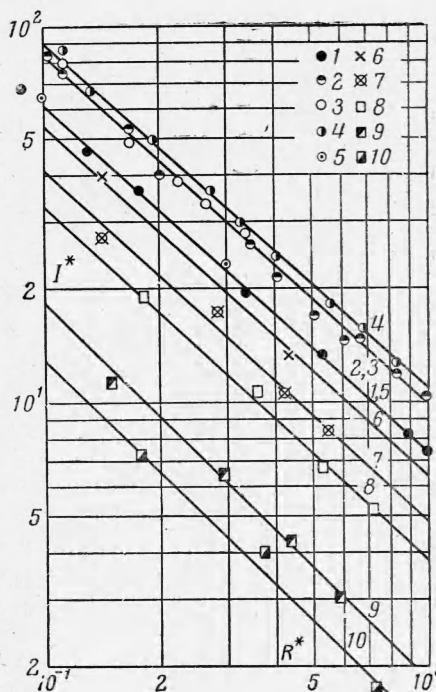
$$R^* = R / \sqrt[3]{cQ}, \quad I^* = I / \sqrt[3]{cQ}$$

при взрыве различных источников в воде. При анализе экспериментальных данных воспользуемся методами теории размерностей.

Фиг. 2. Зависимость приведенного удельного импульса

$$I^* = I / \sqrt[3]{cQ} \text{ кгсек/м}^2 \text{ ккал}^{1/3}$$

от расстояния  $R^* = R / \sqrt[3]{cQ} \text{ м/ккал}^{1/3}$  при подводном взрыве. Кривые 1—4 — взрывы зарядов из тэна  $\rho_0 = 1600$  и  $400 \text{ кг/м}^3$  и азида свинца  $\rho_0 = 1600$  и  $850 \text{ кг/м}^3$  соответственно; кривые 5—10 — взрывы зарядов из тэна  $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$  в центре сферических полостей с воздухом соответственно ( $R_0 = 1.25 \text{ см}, cQ = 1.17 \text{ ккал}$ )  
 ( $R_0 = 1.85 \text{ см}, cQ = 3.32 \text{ ккал}$ )  
 ( $R_0 = 1.85 \text{ см}, cQ = 1.18 \text{ ккал}$ )  
 ( $R_0 = 1.85 \text{ см}, cQ = 0.59 \text{ ккал}$ )  
 ( $R_0 = 4.17 \text{ см}, cQ = 1.12 \text{ ккал}$ )  
 ( $R_0 = 4.38 \text{ см}, cQ = 0.56 \text{ ккал}$ )



Выпишем систему определяющих параметров при взрыве источника в среде

$$Q, R_0, \rho_0 = \frac{3c}{4\pi R_0^3}, \rho, a, R, n, t \quad (3)$$

Из них можно составить следующие безразмерные комбинации:

$$r = R/R_0, \quad ta/R_0, \quad Q/a^2, \quad \rho_0/\rho, \quad n \quad (4)$$

Между  $r$  и  $ta/R_0$  на фронте имеется функциональная связь, поэтому система независимых определяющих параметров будет

$$r, n, \rho/\rho_0, \quad Q/a^2 \quad (5)$$

Следовательно

$$\Delta p/\rho a^2 = F(r, Q/a^2, \rho_0/\rho, n)$$

В случае подводного взрыва

$$\frac{\Delta p}{\rho a^2} \sim \frac{k}{r^v} \quad \text{при } \Delta p < 1000 \text{ атм} \quad (v = 1.2 \div 1) \quad (6)$$

Здесь  $k$  зависит от свойств источника взрыва и среды. Так как  $n = \text{const}$ , то  $k = \Psi(Q/a^2, \rho_0/\rho)$

Из анализа экспериментальных данных (4,3) следует, что зависимость параметров ударной волны от  $Q/a^2$  и  $\rho_0/\rho$  определяется функцией от их произведения

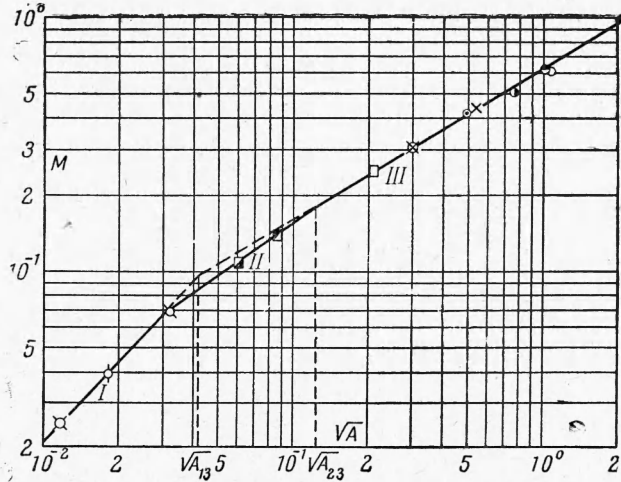
$$A = \frac{Q\rho_0}{\rho a^2} = \frac{3cQ}{4\pi R_0^3 \rho a^2}$$

которое представляет собой относительную объемную плотность энергии взрыва.

Поэтому

$$\frac{\Delta p}{\rho a^2} \sim \frac{\Psi(A)}{r^v} \quad (7)$$

Так как максимальное давление ударной волны будет лишь функцией двух переменных  $A$  и  $r$ , то оно не зависит от массы ВВ и определяется его энергией  $cQ$ , радиусом источника  $R_0$  и расстоянием до центра взрыва  $R$ . Ниже будет показано, что этот факт имеет место и для остальных параметров ударной волны.



Фиг. 3. Кривая для определения областей физического подобия при подводном взрыве по максимальному давлению ударной волны.

Для определения  $\Psi(A)$  на фиг. 3 построен график зависимости

$$M = \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho a^2} r^3} \text{ от } \sqrt{A}$$

С хорошей степенью точности кривую на графике можно описать тремя степенными формулами, использование которых позволяет получить зависимость максимального давления ударной волны от расстояния и свойств источника взрыва

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p}{\rho a^2} &= F_1 \left( \frac{r}{A} \right) & (10^{-4} \leq A \leq 10^{-3}) \\ \frac{\Delta p}{\rho a^2} &= F_2 \left( \frac{r}{A^{1/3}} \right) & (10^{-3} \leq A \leq 0.015) \\ \frac{\Delta p}{\rho a^2} &= F_3 \left( \frac{r}{A^{1/2}} \right) & (0.015 \leq A \leq 4.5) \end{aligned} \quad (8)$$

Пользуясь законом энергетического подобия, для взрыва в воздухе, в тех же обозначениях можно написать

$$\frac{\Delta p}{\rho a^2} = F_4 \left( \frac{r}{A^{1/3}} \right) = F_4 \left[ \left( \frac{4}{3} \pi \right)^{1/3} \frac{R}{R_*} \right] \quad (9)$$

Следовательно, при взрыве в воздухе и в воде относительное давление  $\Delta p / \rho a^2$  зависит лишь от одного параметра  $R^*$

$$R^* = \beta A^\alpha r \quad (10)$$

Показатель степени  $\alpha$  меняется с изменением плотности энергии взрыва  $A$ , однако, согласно (8) и (9) существует четыре диапазона в которых  $\alpha$  можно считать постоянной и которые назовем областями эмпирического подобия

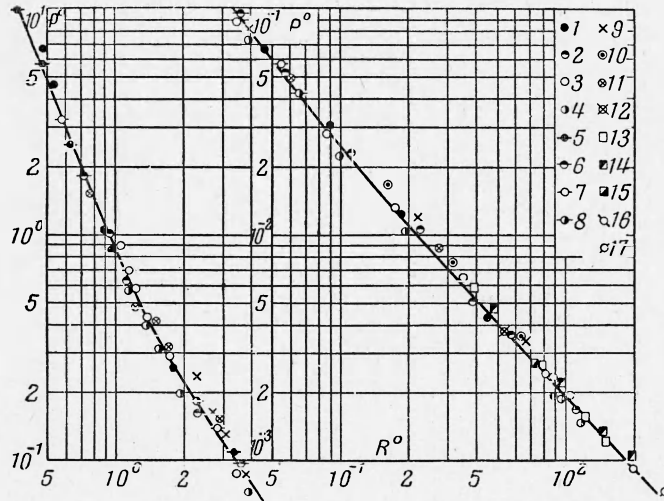
$$\begin{aligned} \text{(I)} \quad \alpha &= -1 \quad (10^{-4} \leq A \leq 10^{-3}) & \text{(III)} \quad \alpha &= -1/2 \quad (0.015 \leq A \leq 4.5) \\ \text{(II)} \quad \alpha &= -2/3 \quad (0.001 \leq A \leq 0.015) & \text{(IV)} \quad \alpha &= -1/3 \quad (10^4 \leq A \leq 10^5) \end{aligned} \quad (11)$$

Взрывы точечных источников в воде и ВВ в воздухе удовлетворяют подобию типа IV, взрыв ВВ в воде типа III.

Подводный взрыв заряда в воздушной полости в зависимости от плотности энергии взрыва  $A$  подчиняется I, II или III типу эмпирического подобия.

Границы областей эмпирического подобия при подводном взрыве были найдены в точках пересечения отрезков прямых с постоянным наклоном  $\alpha$  на фиг. 3. Границу

между третьей и четвертой областями подобия не удалось установить из-за отсутствия экспериментальных данных в этом диапазоне.



Фиг. 4. Зависимость максимального давления ударной волны  $p^0 = \Delta p / \rho a^2$  от приведенного расстояния  $R^0$  при подводном взрыве; 1-4 — взрыв зарядов из тэна с  $\rho_0 = 1600$  и  $\rho_0 = 400$  кг/м<sup>3</sup> и азида свинца с  $\rho_0 = 1600$  и  $850$  кг/м<sup>3</sup> в воде соответственно; 5-8 — взрыв тех же ВВ в воздухе; 9-17 — взрывы в воде зарядов из тэна в сферических полостях с воздухом соответственно:  $R_0 = 1.25$  см,  $cQ = 1.17$  ккал;  $R_0 = 1.85$  см,  $cQ = 3.32$  ккал;  $R_0 = 1.25$  см,  $cQ = 3.5$  ккал;  $R_0 = 1.85$  см,  $cQ = 1.18$  ккал;  $R_0 = 1.85$  см,  $cQ = 0.59$  ккал;  $R_0 = 4.17$  см,  $cQ = 1.12$  ккал;  $R_0 = 4.37$  см,  $cQ = 0.56$  ккал;  $R_0 = 8$  см,  $cQ = 1.12$  ккал;  $R_0 = 12$  см,  $cQ = 1.12$  ккал.

На фиг. 4 построен график зависимости максимального давления ударной волны от приведенного расстояния в координатах  $(p^0 = \Delta p / \rho a^2, R^0)$  при взрыве в воде и в воздухе. С точностью до разброса экспериментальные данные за исключением области  $r < 15$  при взрыве в воздухе ложатся на кривую, которую можно описать эмпирической формулой

$$p^0 = \frac{0.45}{R^{2.3}} + \frac{0.05}{R^{2.2}} + \frac{0.48}{R^0 \sqrt{\ln R^0 + 1.75}} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} R^0 &= 0.041 r A^{-1} & (10^{-4} \leq A \leq 10^{-3}) \\ R^0 &= 0.5 r A^{-1.3} & (10^{-3} \leq A \leq 0.015) \\ R^0 &= r A^{-1/2} & (0.015 \leq A \leq 4.5) \\ R^0 &= 0.778 r A^{-1/3} & (\text{При взрыве ВВ в воздухе}) \end{aligned}$$

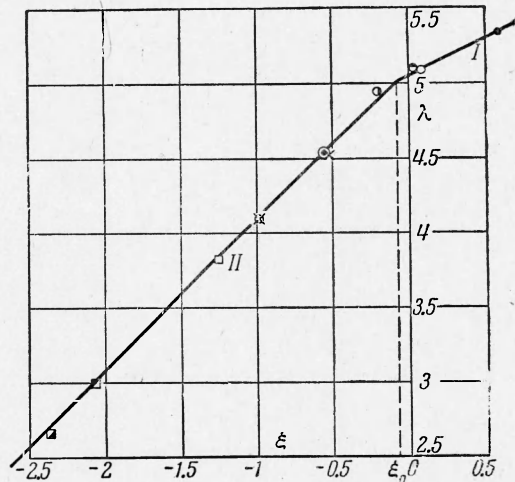
Коэффициенты (3) в формуле (10) определялись в точках пересечения кривых подобия типов I, II и IV с типом III на фиг. 3.

Из анализа экспериментальных данных [1] следует, что зависимость удельного импульса от расстояния и размера источника имеет вид

$$I / R_0 = B r^{-s}$$

где  $s = 1 \div 0.9$ , а  $B$  зависит от свойств источника.

10 ПМТФ, № 2



Фиг. 5. График, определяющий области физического подобия по удельному импульсу ударной волны при подводном взрыве.

Предположим, что  $B = B(A)$ . Для определения  $B(A)$  на фиг. 5 построен график, по координатным осям которого отложены

$$\lambda = \lg \left( \frac{I}{R_0} r^s \right), \quad \xi = \lg A^s$$

Функцию  $B(A)$  можно описать двумя степенными зависимостями

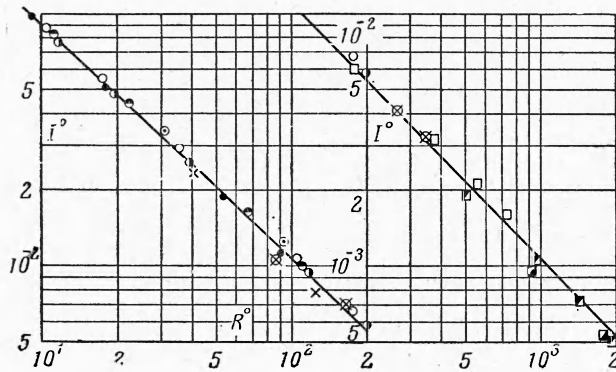
$$0.6 \leq A \leq 4.5, \quad B(A) = A^{s/2} \text{ — взрыв в воде ВВ}$$

$$0.004 \leq A \leq 0.6, \quad B(A) = A^s \text{ — подводный взрыв в воздушной полости} \quad (13)$$

В соответствии с (13)

$$I/R_0 = f(rA^{-1/2}) \quad (0.6 \leq A \leq 4.5), \quad I/R_0 = f_1(rA^{-1}) \quad (0.004 \leq A \leq 0.6) \quad (14)$$

Зависимость приведенного удельного импульса  $I^\circ = I/R_0 \rho a$  от расстояния  $R^\circ$  показана на фиг. 6, где



$$R^\circ = rA^{-1/2} \quad (0.6 \leq A \leq 4.5)$$

$$R^\circ = 0.95 rA^{-1} \quad (0.004 \leq A \leq 0.6)$$

Все экспериментальные данные о удельном импульсе при взрыве любых источников в воде в этих координатах ложатся на одну кривую, которую можно описать формулами (15)

$$I^\circ = \frac{0.75}{(R^\circ)^{0.92}} \quad (R^\circ < 100),$$

$$I^\circ = \frac{1.12}{R^\circ} \quad (R^\circ > 100)$$

Фиг. 6. Зависимость удельного импульса  $I^\circ = I/R_0 \rho a$  ударной волны от приведенного расстояния  $R^\circ$  при подводном взрыве

волны при взрыве в воде от плотности энергии [взрыва  $A$  получена так же, как и для импульса ударной волны.

При взрыве ВВ в воде (16)

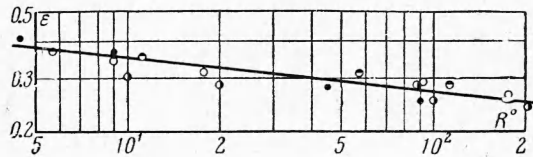
$$\epsilon = \frac{0.45}{(rA^{-1/2})^{0.11}} \quad (0.6 \leq A \leq 4.5)$$

При взрыве в полости

$$\epsilon = \frac{0.99}{(rA^{-5.2})^{0.14}} \quad (17)$$

На фиг. 7 приведен график зависимости  $\epsilon = f(R^\circ)$  при подводном взрыве ВВ, где

$$R^\circ = rA^{-1/2}$$



Фиг. 7. Зависимость приведенной энергии  $\epsilon = E/cQ$  ударной волны от расстояния  $R^\circ = rA^{-1/2}$  при подводном взрыве ВВ

Все экспериментальные данные ложатся на одну кривую (16).

Автор благодарит В. Н. Костюченко за обсуждение и ценные советы.

Поступила 29 X 1962

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Христофоров Б. Д. Параметры ударной волны и газового пузыря при подводном взрыве зарядов разной плотности из тэна и азида свинца. ПМТФ, 1961, № 4.
2. Христофоров Б. Д. Параметры ударной волны при взрыве в воздухе зарядов из тэна и азида свинца разной плотности. ПМТФ, 1961, № 6.
3. Христофоров Б. Д. Подводный взрыв в воздушной полости. ПМТФ, 1962, № 6.
4. Садовский М. А. Механическое действие воздушных ударных волн. АН СССР. Сб. Физика взрыва, 1952, № 1.