

и сообщает ему начальную скорость. Рассмотрение такого взаимодействия в акустическом приближении дало величину слоя, примерно на порядок меньшую, чем определенную по зависимости (7.1).

Расхождение может быть объяснено тем, что акустическое приближение, видимо, неверно. Кроме того, возможен ряд отколов, так что в результате общий слой может быть значительно больше, чем отдельные. Вообще нужно отметить, что взаимодействие ударной волны с поверхностью особенно для малых h/R_0 , слабо изучено, так же как и вопрос о кавитации воды. Нужно отметить, что в действительности на торможение купола оказывает влияние сила тяжести, а также возможная разность между давлением внутри купола и атмосферным давлением. Однако, можно ограничиться рассмотрением только тех случаев, когда скорость подъема купола достаточно велика. Оценка показывает, что принятая схема торможения купола верна для глубин погружения заряда $h \leq 6R_0$. При этом влияние силы тяжести начинает сказываться для зарядов значительного веса.

В заключение нужно отметить, что весь приведенный расчет носит оценочный характер.

Поступила
12 V 1959

ЛИТЕРАТУРА

1. Коул Р. Подводные взрывы. ИИЛ, 1959.
2. Отчет по исследованию процесса образования газового пузыря. Отдел технической информации, перевод № 250—251.

ПАРАМЕТРЫ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И ГАЗОВОГО ПУЗЫРЯ ПРИ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ ЗАРЯДОВ ИЗ ТЭН МАЛОГО ВЕСА

Б. Д. Христофоров

(Москва)

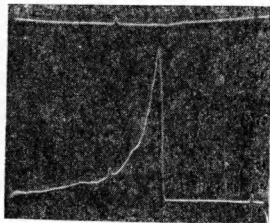
Для изучения масштабных эффектов при моделировании приводятся некоторые результаты исследования параметров подводного взрыва сферического заряда ТЭН малого веса (от 0.2 до 1.0 г).

В работе производились измерения давления p (атм) во фронте ударной волны, постоянной времени спада давления за фронтом волны θ (мксек), удельного импульса ударной волны I (кгсек/м²).

Кроме этого, исследовалось расширение газового пузыря при его первой пульсации.

1. Описание экспериментов. Опыты проводились в стальном баке с водой размером $1.5 \times 1.5 \times 1.0$ м³, имеющем смотровые окна из оптического стекла, через которые осуществлялось покадровое фотографирование пульсации газового пузыря на движущуюся пленку.

Измерение параметров ударных волн производилось с помощью турмалиновых датчиков с диаметром чувствительного элемента от 1 до 3 мм.



Фиг. 1

Тарировка датчиков осуществлялась взрывом. При этом сравнивались показания исследуемых индикаторов с протарированными ранее при взрыве тротила. Для записи сигнала от индикатора применялись осциллографические установки ПИД-9, разработанные в ИХФАН СССР. Верхняя граничная частота измерительного тракта прибора 300 кГц.

Заряд ВВ помещался посередине бассейна на расстоянии 300 мм от свободной поверхности воды при измерении параметров ударной волны и на расстоянии 170 мм при фотографировании пузыря.

Такое расположение заряда позволяло надежно определять параметры ударной волны в диапазоне $0.065 \leq$

$\leq G^{1/3}/L \leq 0.65$, где G — вес заряда в кг, L — расстояние от заряда до точки измерения в м.

2. Заряды. Заряды, которыми пользовались при проведении опытов, изготовлялись из ТЭН прессованием до плотности 1.6 г/см³.

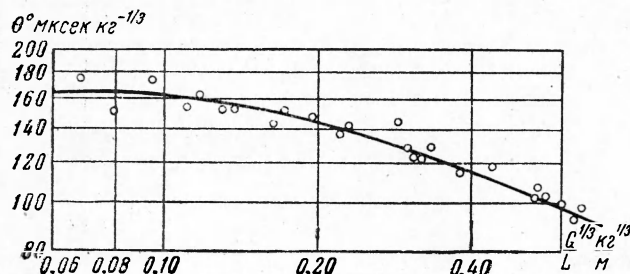
Детонатором служила навеска азида свинца, помещенная в центре заряда весом около 5% от полного. В качестве промежуточного детонатора применялся порошкообраз-

ный ТЭН. Иницирование осуществлялось взрывом манганиновой проволоочки толщиной 0.05 мм, пропущенной сквозь заряд, при прохождении через нее импульса тока.

Энергия электрического импульса составляла около трех калорий. В работе использовались заряды весом 0,2, 0,6 и 1.0 г.

3. Постоянная времени θ спада давления в ударной волне. На фиг. 1 приведена типичная осциллограмма ударной волны. Рассмотрение экспериментальных кривых $p = p_m f(t)$ показывает, что функция $f(t)$ вблизи фронта ударной волны совпадает с экспонентной. Поэтому в качестве временной характеристики принято брать постоянную экспоненциального спада θ давления в ударной волне.

В течение этого времени давление в ударной волне падает в e раз.



Фиг. 2

На фиг. 2 приведен график зависимости постоянной времени ударной волны

$$\frac{\theta}{G^{1/3}} = \theta^0 \frac{\text{мксек}}{\text{кг}^{1/3}} \quad \text{от} \quad \frac{G^{1/3}}{L}$$

в логарифмической системе координат, построенный по экспериментальным точкам. Эта кривая удовлетворительно согласуется с данными для пентолита и лежит значительно ниже аналогичной кривой для тротила.

4. Давление на фронте ударной волны. При определении максимального давления p_m необходимо учитывать завал фронта ударной волны на осциллограмме, который имеет место при конечных размерах датчиков и ограниченной полосе пропускания частот измерительного тракта. При этом измеренное давление во фронте волны p_1 несколько ниже истинного давления p_m .

В процессе обработки экспериментальных данных истинное максимальное давление в ударной волне определялось по формуле (1)

$$p_m = p_1 \left(1 + \frac{a_\Phi 10^6}{2c\theta} \right) \quad \left(a_\Phi = \sqrt{a^2 + \left(\frac{0.35c}{f} \right)^2} \right) \quad (1)$$

Здесь a — диаметр датчика в м, c — 1500 м/сек, f — верхняя граничная частота измерительного тракта в гц , θ — постоянная времени волны в мксек.

Смысл вводимой поправки очевиден и не нуждается в пояснении. Величина ее, как правило, не превышала 5%.

Экспериментальные данные по давлению во фронте ударной волны приведены на графике на фиг. 3 в логарифмической системе координат; на основании этих данных может быть принята эмпирическая зависимость

$$p_m = 645 \left(\frac{G^{1/3}}{L} \right)^{1.2} \quad (2)$$

Давления, рассчитанные по формуле (2), на близких расстояниях примерно на 15% выше давлений, имеющих место при взрыве тротила.

В конце исследуемого диапазона значения давлений для обоих веществ практически совпадают.

5. Удельный импульс ударной волны. Удельный импульс I ударной волны, как известно, равен

$$I = \int_0^{\tau} p(t) dt \quad (3)$$

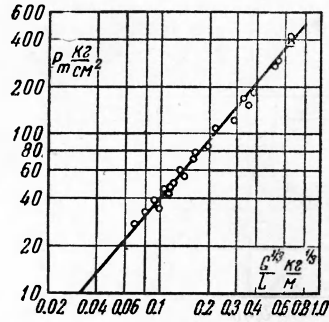
где τ — полное время действия ударной волны.

Ввиду медленного затухания давления в хвостовой части волны момент времени, при котором давление обращается в 0, равен примерно 200θ .

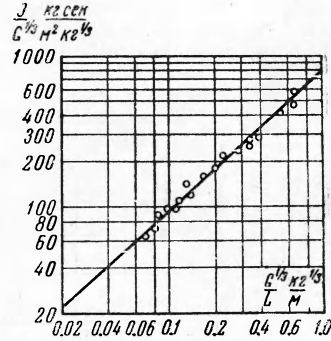
Интегрирование до этого верхнего предела связано с большими экспериментальными трудностями, в то время как основные особенности кривой давление — время для всех взрывчатых веществ выявляются в диапазоне $0 < t < 5\theta$.

Отношение импульсов для двух каких-либо взрывчатых веществ при верхнем пределе интегрирования $\tau > 50$ обычно мало меняется. Поэтому при определении импульса ударной волны величину τ берут равной $(5-10) \theta$.

В рассматриваемом случае $\tau = 5.5\theta$. Для каждого значения $G^{1/3}/L$ величина θ определялась из ранее построенного графика на фиг. 2. Интегрирование производилось определением площади эпюры ударной волны.



Фиг. 3



Фиг. 4

На фиг. 4 на графике приведены экспериментальные данные по измерению удельного импульса ударной волны для зарядов различного веса, на основании этих данных может быть предложена эмпирическая зависимость

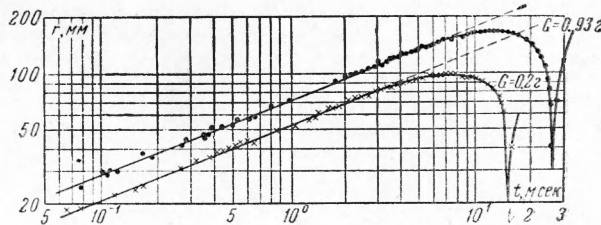
$$I = 772 \sqrt[3]{G} \left(\frac{\sqrt{G}}{L} \right)^{0.92} \text{ кгсек/м}^2 \quad (4)$$

6. Расширение газового пузыря. На фиг. 5 приведена зависимость радиуса газового пузыря r в мм от времени t , отсчитанного от начала взрыва в миллисекундах в диапазоне $0.1 \leq t \leq T \text{ мсек}$, где T — период первой пульсации пузыря.

В интервале $0.1 \leq t \leq 1/4 T \text{ мсек}$ в первом приближении закон движения газового пузыря можно описать формулой

$$r = 287 G^{0.2} t^{0.4} \text{ мм} \quad (5)$$

Эта формула с точностью до коэффициента совпадает с предложенной Седовым [2] для точечного взрыва в несжимаемой жидкости.



Фиг. 5

Дифференцируя (5) по времени, можно получить скорость расширения пузыря

$$V = 115 \frac{G^{0.2}}{t^{0.6}} = 558 \cdot 10^3 \frac{G^{0.5}}{r^{3/2}} \text{ м/сек} \quad (6)$$

При этом, как и везде, G — в кг а r — в мм. Выражая вес заряда ВВ через его радиус r_0 при плотности $\rho = 1.6 \text{ г/см}^3$ по формуле $r_0 = 53 G^{1/3}$, для скорости расширения газового пузыря получим выражение

$$V = \frac{1450}{(r/r_0)^{3/2}} \text{ м/сек} \quad (7)$$

В случае точечного взрыва с энергией, равной $Q_0 = 1400 \text{ ккал/кг } G \text{ кг}$ для ТЭН, используя решение Седова [2], получим выражение для радиуса пузыря

$$r = 249 G^{0.2} t^{0.4} \text{ мм} \quad (8)$$

из которого видно, что точечный взрыв дает меньший радиус пузыря, чем взрыв ВВ с той же энергией. Чтобы получить такой же радиус пузыря, как при взрыве ВВ, при точечном взрыве необходима энергия, примерно в 2 раза большая.

Период первой пульсации газового пузыря T , полученный при обработке фотографий при взрыве зарядов весом 0,2, 0,6 и 1,0 г. можно описать формулой

$$T = 267 \sqrt[3]{G}$$

или

$$T = 272 \frac{G^{1/3}}{p_0^{5/6}} \quad (9)$$

Здесь $p_0 \text{ кг/см}^2$ — полное гидростатическое давление в воде, равное сумме атмосферного давления и давления столба воды высотой, равной глубине взрыва.

Результаты измерения максимального радиуса пузыря в зависимости от веса заряда представлены на фиг. 6. На том же графике проведена по экспериментальным точкам кривая, определяемая эмпирической зависимостью

$$r_m = 1760 \sqrt[3]{\frac{G}{p_0}} \quad (10)$$

Здесь G — вес заряда в кг, r_m — максимальный радиус газового пузыря в мм, p_0 — гидростатическое давление в кг/см^2 .

Известна эмпирическая зависимость такого же вида максимального радиуса газового пузыря от веса заряда для тротила

$$r_m = 1570 \sqrt[3]{\frac{G_{\text{тр}}}{p_0}} \quad (11)$$

Если подставить в формулу (11) тротильный эквивалент ТЭН, равный $1,4 G_{\text{тр}}$, то получим зависимость (10).

Зная максимальный радиус газового пузыря, можно оценить ту часть Y энергии взрыва Q , которая остается в пузыре после излучения ударной волны и тратится на преодоление гидростатического давления [1]; вычисления дают

$$Y = \frac{4}{3} \pi p_0 r_m^3 \quad (12)$$

Оценка по этой формуле дает величину энергии $Y = 523 \text{ кал/г}$, что составляет 37,4% от энергии взрыва ТЭН $Q = 1400 \text{ кал/г}$.

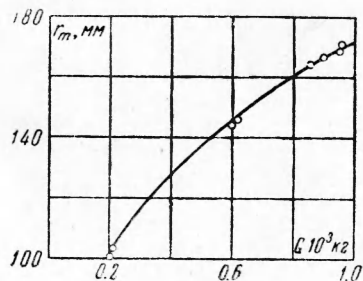
Следует отметить, что формула (10) не учитывает влияния свободной поверхности воды на движение газового пузыря. Используя адиабату расширения продуктов взрыва тротила, вычисленную Джонсом, можно на основании приведенных в работе [1] расчетов показать, что в нашем случае влияние свободной поверхности воды приводит к уменьшению максимального радиуса пузыря примерно на 5%.

Введение такой поправки в формуле (12) дает значение энергии $Y = 600 \text{ кал/г}$, что составляет примерно 43% от полной энергии взрыва ТЭН и находится в удовлетворительном согласии со значением величины $Y = 0.41 Q_{\text{тр}}$ для тротила [1].

Поступила
20. I 1960

ЛИТЕРАТУРА

1. Коул Р. Подводные взрывы. ИЛ, 1950.
2. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. Гостехтеоретиздат, М., 1957.



Фиг. 6