

УДК 622.215.2

О ВЛИЯНИИ ОБОЛОЧКИ НА НАЧАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОДВОДНОГО  
ВЗРЫВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ВВ

М. К. Баранев, В. М. Вителлис, К. М. Шумов

(Москва)

Экспериментально определены начальные параметры ударных волн в воде при взрыве цилиндрических зарядов тротила в оболочках. Показано, что эти параметры зависят главным образом от динамической жесткости материала и относительного веса оболочки. Установлено, что в процессе расширения оболочки заряда при взрыве в ограниченных объемах воды образуется область чрезвычайно быстрого расширения, границу которой можно отождествить с границей продукты детонации — вода после разрушения оболочки, совпадающего по времени с приходом фронта кавитации.

Вопрос о подводном взрыве цилиндрических (удлиненных) зарядов ВВ рассматривался в [1-5]. В [1, 4, 5] приведены данные о давлениях на фронте ударных волн (УВ)  $P_f$  для открытых зарядов на сравнительно больших удалениях от их поверхности, что не позволяет оценить величину начального давления на фронте УВ  $P_{f0}$ . В [2] для открытых зарядов тэна (плотность  $\rho = 1.67 \text{ г/см}^3$ , скорость детонации  $D = 8.4 \text{ км/сек}$ ) величина  $P_{f0}$  на поверхности заряда составила  $195 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ . Подводный взрыв удлиненных зарядов в оболочках (насыпные заряды тэна в бумажных оболочках,  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ ,  $D = 5.5 \text{ км/сек}$ , а также детонирующие шнуры из тэна и гексогена) изучался в [3], причем начальное давление на фронте УВ  $P_{f0}$  оказалось равным  $35 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ . Однако существенное изменение параметров детонации зарядов по сравнению с [2] не позволяет судить о степени влияния оболочки заряда на начальные параметры подводной УВ.

Эксперименты по изучению влияния оболочек на начальные параметры УВ в воде проводились в прозрачных плоскопараллельных аквариумах, с размерами  $100 \times 100 \times 150 \text{ мм}^3$ . В качестве ВВ использовались цилиндрические заряды тротила ( $\rho = 1.55 \text{ г/см}^3$ ,  $D = 6.7 \text{ км/сек}$ ) диаметром  $2R_0 = 12 \text{ мм}$  и длиной  $42 \text{ мм}$ . Заряды ВВ подрывались в оболочках, изготовленных из плексигласа и дюралюмина с толщиной стенки  $1 \text{ мм}$  и стали (Ст. 3) с толщинами стенок  $0.5, 1$  и  $2 \text{ мм}$ . Иницирование производилось с одного из торцов с помощью безынерционных детонаторов. Внутренний радиус всех оболочек был равен  $6.5 \text{ мм}$ . Фоторегистрация взрыва проводилась с помощью СФР-2 с использованием импульсных источников света.

Съемка велась в варианте щелевой развертки. Заряды ВВ во всех случаях крепились горизонтально в средней части одной из стенок аквариума. Ширина щели  $0.2 \text{ мм}$ , скорость развертки  $2 \text{ км/сек}$ .

Фотограммы развертки процесса взрыва зарядов ВВ в воде показаны на фиг. 1-3, где I — оболочка заряда до взрыва, II — УВ в воде, III — расширяющаяся оболочка заряда, IV — область чрезвычайно быстрого расширения. Масштаб времени (по горизонтали) —  $3 \text{ мм} = 1 \text{ мксек}$ .

Фиг. 1 относится к взрыву заряда в стальной оболочке толщиной  $1 \text{ мм}$ , фиг. 2 — в дюралюминовой оболочке, фиг. 3 — в плексигласовой оболочке. Наличие светлых полос на участке III фотограммы (фиг. 2) свидетельствует об образовании трещин в дюралюминовой оболочке при прохождении детонационной волны по заряду ВВ. Белое пятно на границе участков I и II фотограммы (фиг. 3) вызвано, по-видимому, свечением воздуха в зазоре между ВВ и оболочкой при выходе волны детонации на поверхность заряда, которое в данном случае наблюдается из-за прозрачности плексигласовой оболочки.

Обработка полученных фотограмм сводилась к измерению удалений  $\Delta R$  фронта УВ от поверхности оболочки через определенные промежутки времени  $\Delta \tau$ . Средние (по двум опытам) значения  $\Delta R = \Delta R(\Delta \tau)$  мм даны в табл. 1.

Приведенные в табл. 1 данные были аппроксимированы следующей зависимостью (с погрешностью не более 3-5% в диапазоне  $0 \leq \Delta R^* \leq 2.3$ ,  $0 \leq \Delta \tau^* \leq 4.5$ )

$$\Delta R^* = V_0^* (1 + \Delta \tau^*)^m \ln(1 + \Delta \tau^*) \quad (1)$$

где

$$\Delta R^* = \Delta R / R_0, \quad \Delta \tau^* = \Delta \tau D / R_0,$$

$V_0^*$  и  $m$  — опытные константы.

Константа  $V_0^*$  по своему физическому смыслу является безразмерной начальной скоростью распространения УВ по нормали к поверхности оболочки. Действительно

$$\frac{d(\Delta R^*)}{d(\Delta \tau^*)} = \frac{1}{D} \frac{d(\Delta R)}{d(\Delta \tau)} = \frac{V_0}{D} = V_0^* \frac{m \ln(1 + \Delta \tau^*) + 1}{(1 + \Delta \tau^*)^{1-m}} \quad (2)$$

откуда, при  $\Delta \tau^* = 0$ , имеем  $V_0 / D = V_0^*$ .

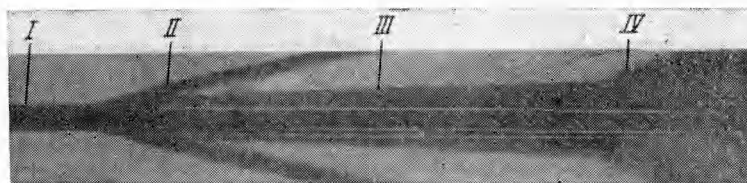
Таблица 1

Материал оболочки заряда и ее внешний радиус $R_1$ , мм	$\Delta\tau$ , мксек							
	0.333	0.667	1.000	1.333	1.667	2.000	3.000	4.000
Плексиглас, $R_1 = 7.65$	2.15	3.20	4.41	5.39	6.55	7.65	10.70	13.45
Дюралюмин, $R_1 = 7.60$	1.35	2.54	3.80	4.68	5.98	7.15	10.09	12.95
Ст. 3, $R_1 = 7.00$	1.44	2.46	3.64	4.85	5.96	6.87	10.00	12.66
Ст. 3, $R_1 = 7.50$	1.12	2.04	2.73	3.81	4.66	5.59	8.71	11.15
Ст. 3, $R_1 = 8.50$	0.90	1.76	2.60	3.50	4.40	5.26	7.58	10.20

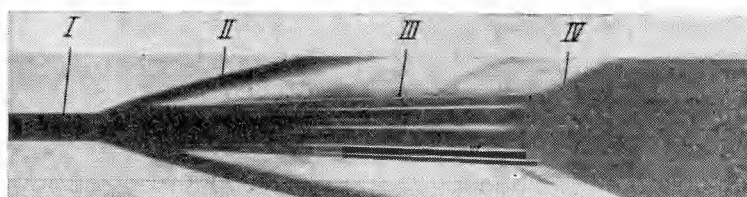
Истинная безразмерная начальная скорость фронта УВ  $N_{f_0}^* = N_{f_0} / D$  при скользящей детонационной волне находилась согласно [3] из выражения

$$N_{f_0}^* = V_{f_0}^* (1 + V_{f_0}^{*2})^{-1/2} \quad (3)$$

Далее, используя известные гидродинамические соотношения, были рассчитаны начальные давления  $P_{f_0}$  и массовые скорости  $U_{f_0}$  на фронте УВ, приведенные в табл. 2.



Фиг. 1



Фиг. 2

Из табл. 2 следует, что начальные параметры УВ в воде зависят в основном от динамической жесткости материала оболочки и отношения весов оболочки и заряда ВВ; другие характеристики существенного влияния (в пределах точности опыта) не оказывают. Следует отметить, что определенное в данных экспериментах значение  $P_{f_0}$  для открытого заряда тротила по методу, изложенному выше, равно  $62.5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ , что практически совпадает с соответствующим значением  $P_{f_0}$  для заряда в плексигласовой оболочке.

В работе [2] для открытого заряда тэна  $P_{f_0} = 195 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ . Можно предположить, что такой результат получен для распространения фронта УВ по нормали, т. е. без учета истинного направления скорости фронта УВ при скользящей детонации. В данных опытах для тротила в плексигласовой оболочке, что практически соответствует открытому заряду, при фугасной теплоте взрыва  $Q_{вт} = 1200 \text{ ккал/кг}$  нормальная скорость фронта УВ  $V_0 = 5.89 \text{ км/сек}$ ; такой скорости согласно [5] отвечает  $P_{f_0} = 160 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ . Для тэна ( $Q_{вт} = 1460 \text{ ккал/кг}$ ) имеем  $P_{f_0} = 160 \cdot 10^3 \cdot (1460 / 1200) \approx 195 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$ , что совпадает с величиной  $P_{f_0}$  [2].

Таблица 2

Материал оболочки и его динамическая жесткость $\rho C_0 \cdot 10^{-8}$ , г/см <sup>2</sup> ·сек	Отношение веса оболочки к весу заряда ВВ	$V_0^*$	$m$	$N_{f_0}^*$	$N_{f_0}$ , км/сек	$P_{f_0} \cdot 10^{-8}$ , кг/см <sup>2</sup>	$U_{f_0}$ , км/сек
Плексиглас, $\rho C_0 = 3.4$	0.30	0.880	0.202	0.664	4.45	63.0	1.40
Дюралюмин, $\rho C_0 = 14$	0.64	0.586	0.463	0.506	3.39	28.5	0.82
Ст. 3, $\rho C_0 = 43$	1.0	0.613	0.407	0.523	3.50	31.0	—
	2.0	0.456	0.496	0.415	2.78	14.5	0.51
	4.0	0.447	0.502	0.412	2.76	13.3	—

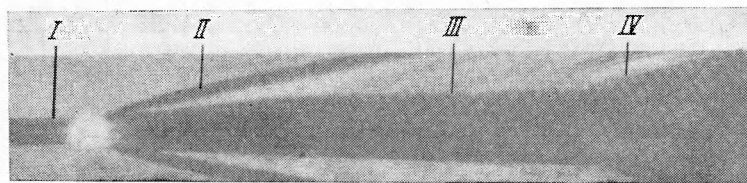
Интересно сопоставить опытные значения начальных параметров УВ на границе сред оболочка — вода с расчетными. Такое сопоставление для оболочек толщиной 1 мм из плексигласа, дюралюмина и стали дано в табл. 3. Методы расчета начальных параметров УВ на границе различных сред изложены в [6,7]

Таблица 3

Материал оболочки	$P_{f_0} \cdot 10^{-8}$ , кг/см <sup>2</sup>		$U_{f_0}$ , км/сек	
	опыт	расчет	опыт	расчет
Плексиглас	63.0	60.0	1.40	1.43
Дюралюмин	28.5	37.8	0.82	1.06
Ст. 3	14.5	18.9	0.51	0.66

Если учесть приближенность расчетных методов, а также принятое при расчетах допущение о неизменности параметров УВ в оболочках, то сходимость результатов следует признать удовлетворительной.

Вызывает интерес наличие участка IV на фотограммах (фиг. 1—3), характеризующего резким изломом границы изображения, т. е. скачком скорости. Это явление может быть вызвано кавитацией воды в волне разрежения. Данное предположение подтверждается установленным в специально проведенных опытах фактом, что время появления на фотограммах участка IV зависит от объема (линейных размеров) аквариума, в котором производится взрыв.



Фиг. 3

Непосредственное сопряжение на фотограммах участков III и IV свидетельствует о том, что зона кавитации доходит до оболочки заряда. Учитывая, что при этом перед расширяющейся (деформирующейся) оболочкой произойдет резкий спад давления, момент появления участка IV на фотограммах, по-видимому, можно связать с моментом разрушения оболочки.

При рассмотрении приведенных фотограмм может возникнуть предположение: не связано ли появление участка IV с выходом УВ на стенки аквариума и их разрушением, приводящим к потере прозрачности? Однако в рассматриваемых опытах потеря прозрачности стенки аквариума наступала позже, чем начинал фиксироваться участок IV, и поэтому влиять на его появление никак не могла.

Обработка участков IV на фиг. 1—3 дает следующие значения начальных скоростей движения границы быстро расширяющейся области: в случае плексигласовой

оболочки — 5.47 км/сек, в случае дюралюминовой — 5.60 км/сек, в случае стальной — 7.02 км/сек.

Как видно из приведенных данных, эта скорость значительно выше скорости фронта УВ на участке  $II N_{f_0}$ . Если справедливо отождествление границы изображения на участке  $IV$  фотограмм с границей газового пузыря после разрушения оболочки, то такой скачок скорости можно объяснить резким снижением плотности кавитирующей воды [4,8].

Поступила 17 IV 1972

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коул Р. Подводные взрывы. М., Изд-во иностр. лит., 1950.
2. Баум Ф. А., Санасарян Н. С. Влияние гидростатического давления на параметры подводного взрыва. Физика горения и взрыва, 1965, т. 1, № 4.
3. Христофоров Б. Д., Широкова Э. А. Параметры ударной волны при подводном взрыве шнурового заряда. ПМТФ, 1962, № 5.
4. Замышляев Б. В., Яковлев Ю. С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л., «Судостроение», 1967.
5. Яковлев Ю. С. Гидродинамика взрыва. Л., Судпромгиз, 1961.
6. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
7. Орленко Л. П. Подведение материалов при интенсивных динамических нагрузках. М., «Машиностроение», 1964.
8. Перник А. Д. Проблемы кавитации. Л., Судпромгиз, 1966.

УДК 534.222.2

### ПОЛУЧЕНИЕ ВЗРЫВА С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ

*М. А. Лебедев, М. М. Русанов*

(Челябинск)

Описаны результаты опытов по встречному столкновению сгустков частиц вольфрама плотностью  $\sim 1 \text{ г/см}^3$ , движущихся со скоростью 24 км/сек.

В результате столкновения возникает взрыв с концентрацией энергии, более чем в 50 раз превышающей концентрацию энергии в бризантных ВВ.

Перед столкновением каждый из сгустков частиц вольфрама массой 0.18 г, плотностью  $\sim 1 \text{ г/см}^3$ , движущихся со скоростью 24 км/сек, имел диаметр 5 мм и длину 10 мм. Сгустки двигались навстречу друг другу по каналу диаметром 5 мм. Момент столкновения сгустков и распространение образующейся при этом ударной волны регистрировались с помощью фотохронографа СФР-2М и лупы времени СФР-3М. Были проведены опыты по столкновению сгустков в блоках из оргстекла и стали, а также в воздухе.

При столкновении сгустков в блоке из оргстекла фиксировалась форма ударной волны и ее скорость. Съемка производилась в проходящем свете, создаваемом взрывной подсветкой. Снимок, полученный с помощью лупы времени, показан на фиг. 1. Частота съемки  $5 \cdot 10^5$  кадр/сек. Начальная скорость ударной волны в оргстекле 10.5 км/сек (при взрыве тринитротолуола (ТНТ) скорость  $\sim 5.8$  км/сек). На снимке видно, что ударная волна имеет сферическую форму.

Опыты по столкновению сгустков в цилиндрах из стали проводились без регистрации процесса развития взрыва и преследовали цель определения формы и размеров образующейся при столкновении полости. В этих опытах производилось как непосредственное столкновение сгустков, так и через пробку из парафина. Постановка опытов и вид образовавшихся после взрыва полостей в стальных цилиндрах показаны на фиг. 2. На фигуре: *a* — непосредственное столкновение, *b* — столкновение через парафин, *1* — стальной цилиндр, *2* — парафин. Полость, образовавшаяся при непосредственном столкновении сгустков, имеет заметно вытянутую форму и объем  $10.5 \text{ см}^3$ .