

Изучение структурных изменений при сочетании обработки взрывом с термической обработкой требует дальнейших исследований на различных материалах.

Поступила в редакцию 25/VIII 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. N. A. McLeod. Method of Hardening manganese steel. US Patent 2.703.297, March, 1955.
2. G. E. Dieter.— In: Response of metals to High velocity of deformation. N. Y.— L.: Interscience. 1960, p. 409.
3. M. Kangilaski, J. S. Perrin et al. Met. trans., 1971, 2, 9, 2607.
4. L. E. Murr, F. I. Grace. Trans. AIME, 1969, 245, 10, 2225.
5. L. E. Murr, M. F. Rose. Philos. Mag., 1968, 18, 152, 281.
6. М. А. Смирнов, В. П. Левит и др. ФММ, 1978, 45, 1, 133.
7. Е. И. Богдановская, Л. В. Дубнов и др. ФГВ, 1976, 12, 5, 7.81
8. И. П. Гаврильев, А. А. Дерibas, Т. М. Соболенко. Изв. АН СССР. МТТ, 1979, 2, 174.
9. О. А. Банных, В. М. Блинов. Дисперсионно-твердеющие немагнитные ванадийсодержащие стали. М.: Наука, 1980.
10. А. А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.

УДК 533.6.011.72

### НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ СО СЛОЕННЫМИ ОБОЛОЧКАМИ

*С. В. Стебновский, Н. Н. Чернобаев*

*(Новосибирск)*

При исследовании динамической прочности жидкости, а также в ряде прикладных задач (например, в задачах, связанных с гидровзрывной штамповкой металлов) возникает необходимость варьировать начальные параметры ударной волны и взрывного пузыря. Поскольку эти параметры зависят от свойств ВВ и динамической жесткости среды, в которой генерируется ударная волна, для управления начальными параметрами волны и пузыря представляется целесообразным использовать метод подбора специальных прослоек между зарядом ВВ и водой.

Настоящая работа посвящена исследованию характера прохождения ударных волн (УВ) через прослойки, состоящие из материалов с различной динамической жесткостью, определению начальной амплитуды УВ и закона ее затухания в ближней зоне (на расстоянии, меньшем 10 радиусов заряда).

Экспериментальные исследования взрыва цилиндрических зарядов ВВ со слоеными оболочками в воде проводились следующим образом. В объеме, заполненном водой 1 (рис. 1) и ограниченном плоскопараллельными плексигласовыми стенками 2, помещался цилиндрический заряд ВВ 4 в слоеной оболочке 3. В качестве стандартного цилиндрического заряда использовался высоковольтный электродетонатор ЭДВ-1, состоящий из заряда гексогена радиусом 0,325 см, и стальной оболочки толщиной 0,025 см. Предварительной импульсной рентгеновской съемкой установлено, что на рабочем участке  $L = 2,5$  см скорость распространения вдоль оси заряда процесса расширения стальной оболочки вследствие детонации гексогена  $D_* = 6,9$  км/с. Расстояние между тонкими боковыми стенками объема, параллельными оси заряда, выбиралось таким, чтобы УВ, генерируемые в воде в результате взрыва заряда, могли распространяться на расстояние 10 радиусов слоеной оболочки.

Процесс взрыва и генерация ударных волн регистрировались пленочной установкой и скоростным фоторегистратором СФР-1 в двух режимах: покадровой съемки и непрерывной развертки. В последнем случае с помощью узкой щели, расположенной перпендикулярно оси заряда, производилась развертка во времени процесса распространения фронта ударной волны в плоскости, перпендикулярной оси заряда. Обработывались результаты с помощью формул [1]

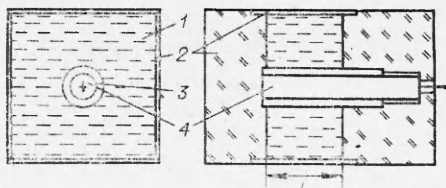


Рис. 1. Схема эксперимента.

$$N = v [1 + (v/D_*)^2]^{-1/2}, N = \left\{ \frac{p_2 - p_1}{\rho_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2 - p_1}{p_2 + B - p_1} \right)^{1/n} \right]} \right\}^{1/2}. \quad (1)$$

Здесь  $v$  — скорость ударной волны вдоль щели;  $N$  — скорость фронта ударной волны;  $\rho_1$  — плотность воды;  $p_2 - p_1$  — перепад давления на фронте ударной волны в воде;  $B = 3,025 \cdot 10^8$  Па,  $n = 7,15$  при  $p_2 - p_1 < 30 \cdot 10^8$  Па;  $B = 4,25 \cdot 10^8$  Па,  $n = 6,29$  при  $p_2 - p_1 > 30 \cdot 10^8$  Па;  $D_*$  — скорость перемещения вдоль оси заряда точки выхода косоугольной ударной волны в воду. Величина  $v$  определялась графическим дифференцированием по времени развертки процесса распространения фронта ударной волны вдоль щели, а  $D_*$  — с помощью предварительной импульсной рентгеновской съемки.

В работе рассматривались случаи взрыва ЭДВ-1 в воздухе, воде, в воде с прослойками из воздуха, с комбинированными прослойками плексиглас — песок. Во всех случаях прослойки изолировались от воды плексигласовой пленкой толщиной 0,012 см.

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что при взрыве ЭДВ-1 в воздухе давление во фронте косоугольной ударной волны остается постоянным на расстоянии четырех радиусов заряда и равно  $60 \cdot 10^8$  Па. В случае взрыва в воде амплитуда давления во фронте косоугольной ударной волны убывает с расстоянием, как показано на рис. 2, 1. Объяснение различного характера затухания УВ в ближней зоне при взрыве ЭДВ-1 в воздухе и воде следует из рис. 3, а, б, построенных в

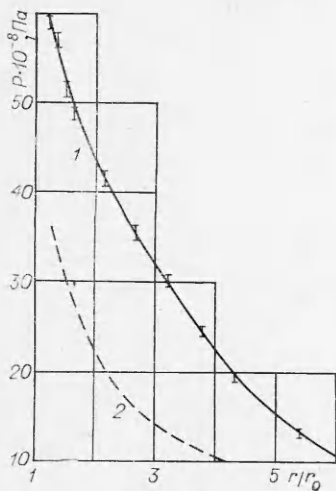


Рис. 2. Затухание УВ в воде при взрыве цилиндрического заряда гексогена со стальной оболочкой (1) и без оболочки (2).

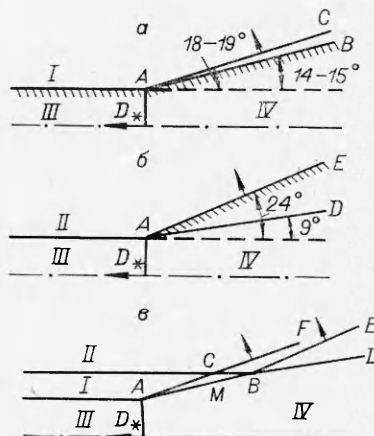


Рис. 3. Схема течений при взрыве цилиндрического заряда с металлической оболочкой в воздухе (а), воде (б) и в воде через воздушный промежуток (в).  
I — воздух; II — вода; III — ВВ;  
IV — ПД.

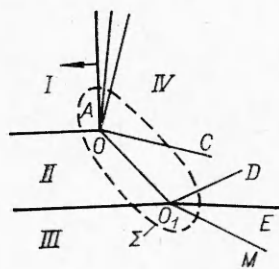


Рис. 4. Область исследуемого течения.

I — гексоген; II — воздух;  
III — вода; IV — ПД.

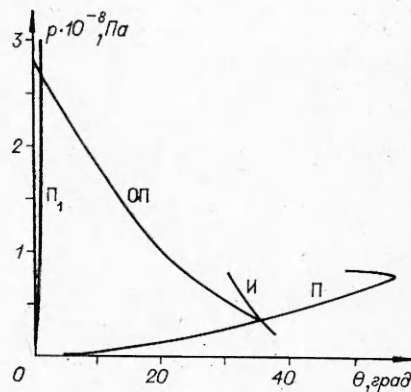


Рис. 5. Графическое решение задачи.

результате наложения покадровой теневой съемки ударных волн и рентгеновской импульсной съемки процесса расширения стальной оболочки. Из рис. 3, а следует, что косая воздушная ударная волна  $AC$  очень близко «прижимается» к расширяющемуся участку стальной оболочки  $AB$  и, таким образом, имея на начальной стадии распространения сильную «поддержку» со стороны оболочки, не затухает. В случае взрыва в воде косая ударная волна  $AE$  достаточно быстро отходит от расширяющейся части оболочки  $AD$  и «поддержка»  $UB$  со стороны оболочки в данном случае слабее, что приводит к затуханию ее амплитуды. На рис. 2, 2 для сравнения показано затухание  $UB$  при взрыве аналогичного цилиндрического заряда гексогена без металлической оболочки. График построен по эмпирической формуле [2]  $p = 46\,500/\bar{r}^{1,08}$  атм,  $1,3 < \bar{r} = r/r_0$ , где  $r_0$  — радиус заряда. Из сравнения следует, что расширение стальной оболочки оказывает большую «поддержку»  $UB$ , нежели расширение продуктов детонации (ПД).

В случае подводного взрыва ЭДВ-1 с воздушными прослойками ( $k = R_0/r_0 = 1,3, 1,5, 2,0$ , где  $R_0$  — радиус цилиндрической воздушной прослойки) картина течения, восстановленная по теневой покадровой съемке  $UB$  и рентгеновской импульсной съемке процесса расширения оболочки, показана на рис. 3, в. На начальной стадии расширения участок оболочки  $AB$  генерирует косую воздушную ударную волну  $AC$ , после падения которой на границу раздела воздух — вода происходит отражение  $CM$  в воздух и преломление  $CF$  в воду. Кроме того, расширяющаяся оболочка, достигнув поверхности воды, резко затормаживается, генерируя в воде волну  $BE$ . Чтобы определить, какая из этих двух  $UB$  регистрировалась в экспериментах на фоторазвертку, проведена теоретическая оценка верхнего предела значения амплитуды волны, преломленной в воду в результате падения на ее поверхность косой воздушной  $UB$ .

В плоской одномерной постановке (рис. 4) рассматривалась задача о взрыве плоского заряда гексогена, расположенного горизонтально над плоской поверхностью воды так, чтобы между  $BB$  и водой был воздушный зазор. Фронт детонационной волны  $OA$  перпендикулярен поверхности  $BB$  и воды. Скорость детонации предполагалась постоянной. Решение такой задачи в плоской постановке дает явно завышенный результат по сравнению с цилиндрическим случаем, т. е. является верхней оценкой амплитуды ударной волны, преломленной в воду через воздушный зазор при взрыве ЭДВ-1.

В предположении, что толщина слоя  $BB$  намного больше воздушного зазора, задача решалась в окрестности фронта волны  $OO_1 \Sigma$ , не включая область пересечения отраженной волны  $OD$  и контактного разрыва  $OC$ . Решение задачи проводилось в стационарной постановке с использованием метода ударных поляр. С учетом того, что течение в области раз-

грузки ПД есть одномерное течение Прандтля — Майера, используя известные уравнения

$$dq/q = \pm d\theta/\sqrt{M^2 - 1}, \quad M = q/c, \quad qdq/d\theta + dp/(\rho d\theta) = 0$$

и уравнения состояния ПД [3]

$$p = [\gamma(\rho) - 1]\rho E + \varphi(\rho),$$

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_\infty, & x > 1, \\ \gamma_0 - (\gamma_0 - \gamma_\infty)x(x^2 - 3x + 3), & x \leq 1, \end{cases}$$

$$\varphi = \begin{cases} \rho_{ок} D_k^2 A (\delta - \delta_*)^m, & x > 1, \\ 0, & x \leq 1, \end{cases}$$

численно строилась изэнтропа разгрузки продуктов детонации И (рис. 5) при максимальной плотности гексогена  $\rho = 1,8 \text{ г/см}^3$ . Здесь  $q$  — скорость набегающего потока;  $c$  — скорость звука;  $\theta$  — угол поворота потока в секторе разрежения ПД;  $p$  — давление ПД;  $E$  — внутренняя энергия ПД;  $\rho$  — плотность ВВ;  $\delta_* = 0,35$ ;  $\delta = \rho/\rho_{ок}$ ;  $\rho_{ок}$  — плотность монокристаллического гексогена;  $D_k$  — скорость детонации монокристаллического гексогена;  $A = 0,1533$ ;  $m = 2,284$ ;  $\gamma_\infty = 1,67$ ;  $\gamma_0 = 1,375$ ;  $x = \delta/\delta_*$ .

Используя стандартные выражения для ударных поляри в воздухе и воде [4], а также ударную адиабату воздуха с учетом ионизации [2] и ударную адиабату воды в форме Тейта, строилась ударная поляри падающей косой УВ в воздухе П, отраженной УВ в воздухе ОП, а также

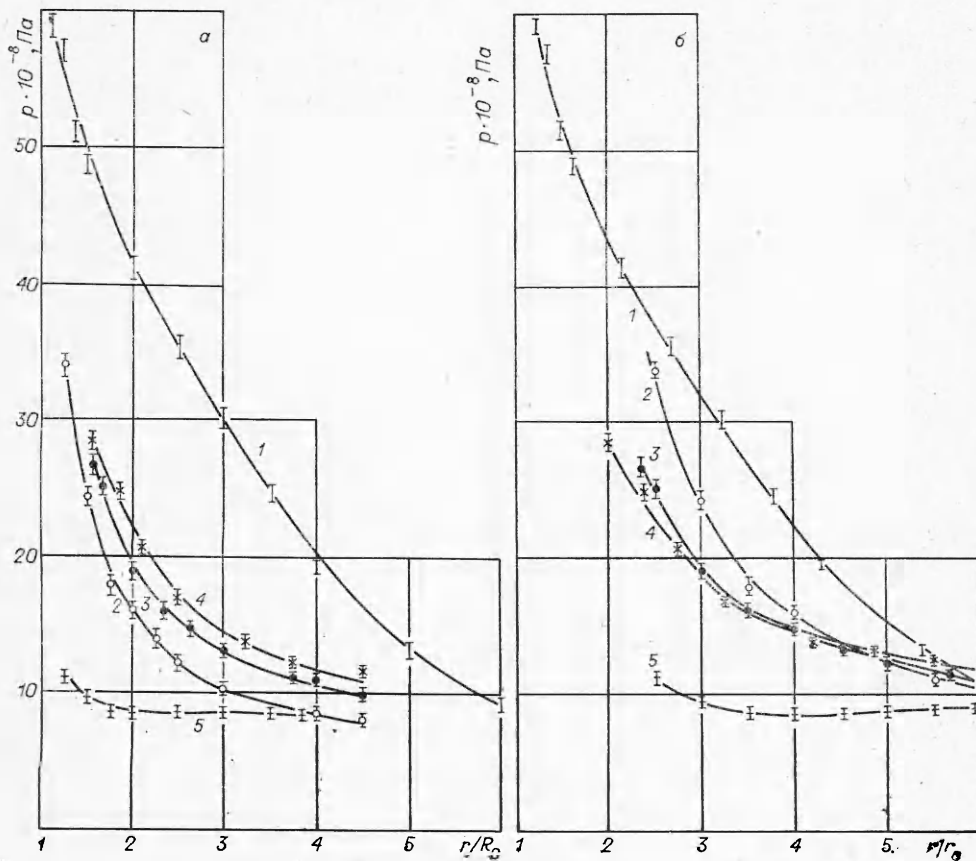


Рис. 6. Графики затухания УВ при подводном взрыве ЭДВ-1.

1 — без прослойки; 2 — с воздушной прослойкой,  $h=2$ ; 3 — с воздушной прослойкой,  $h=1,5$ ; 4 — с воздушной прослойкой,  $h=1,3$ ; 5 — с комбинированной прослойкой плексиглас — песок.

соответствующая ударная поляра для косой УВ в воде  $\Pi_1$  (см. рис. 5). Пересечение ударной поляры для отраженной УВ с ударной полярой воды позволило установить, что при максимальной плотности гексогена  $\rho = 1,8 \text{ г/см}^3$  максимальное давление в УВ, преломленной в воду, равно  $2,8 \cdot 10^8 \text{ Па}$ . Согласно (1), такому давлению соответствует составляющая скорости фронта ударной волны  $v = 1,78 \text{ км/с}$ . Поскольку при обработке фоторазверток процесса генерации УВ в воде вследствие взрыва ЭДВ-1 с воздушными прослойками получены начальные значения скорости фронта УВ вдоль щели в диапазоне 4200—3500 м/с, то регистрируемые ударные волны в воде генерируются при ударе стальной оболочки заряда через воздушный зазор о поверхность воды.

Определенные с помощью импульсной рентгеновской съемки значения  $D_*$  позволили с учетом (1) обработать экспериментальные результаты и построить зависимости давления во фронте УВ в воде при  $k = 1, 1,3, 1,5, 2,0$  от безразмерных расстояний  $R = r/R_0$  и  $\bar{r} = r/r_0$  (рис. 6). Из графиков следует, что в процессе распространения ударной волны степень затухания давления во фронте тем больше, чем больше величина воздушного зазора, но на расстоянии  $\sim 6r_0$  давление во всех случаях выравнивается. Это объясняется тем, что вначале стальная оболочка, разгоняясь в воздушном зазоре, накапливает кинетическую энергию и при ударе о поверхность воды генерирует ударную волну. Но чем больше  $k$ , т. е. величина воздушного зазора, тем к моменту удара ниже давление в ПД и, следовательно, слабее «поддержка» процесса со стороны ПД, а поэтому и более интенсивное затухание УВ.

По аналогичной методике проводилось экспериментальное исследование параметров УВ при подводном взрыве ЭДВ-1 в комбинированной оболочке плексиглас — песок. Внешний радиус плексигласовой прослойки 0,53 см, а прослойки из песка — 0,7 см. Установлено, что в этом случае амплитуда преломленной в воду ударной волны практически не затухает на расстоянии  $6r_0$ , по-видимому, вследствие сильной «поддержки» волны со стороны пористой прослойки из песка.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить принципиальную возможность управления параметрами ударных волн при подводном взрыве в ближней от заряда зоне.

*Поступила в редакцию 1/VII 1981*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Ф. Христофоров, Э. А. Широкова. ПМТФ, 1962, 5.
2. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
3. В. Ф. Куропатенко. ЧММСС, 1977, 8, 6.
4. Р. Курант, К. Фридрихс. Сверхзвуковые течения и ударные волны. М.: ИЛ, 1950.

УДК 662.215.1

### ДЕТОНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ТИПА ВЗВЕСИ С РАЗНОЙ ТЕКСТУРОЙ

*Б. Зыгмунт, Э. Влодарчык, А. Маранда,  
Е. Новачевски, М. Постэк  
(Варшава)*

Водонаполненные взрывчатые вещества, сенсibilизированные алюминиевой пылью, являются трехфазными смесями: твердая фаза — частицы Al, жидкая — насыщенный раствор неорганических нитратов, а пузырьки, образующие газовую фазу, чаще всего заполнены воздухом. Пузырьки газа играют существенную роль в процессе детонации обсужда-