

## ОСЛАБЛЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВЕ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В ОБЪЕМЕ ЖИДКОСТИ, ОГРАНИЧЕННОМ ЭЛАСТИЧНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Б. Е. Гельфанд, М. В. Сильников\*, А. И. Михайлин\*, А. В. Орлов\*

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 117977 Москва

\*Научно-производственное объединение специальных материалов, 194044 Санкт-Петербург

Экспериментально измерены параметры воздушных взрывных волн, образующихся при наземном взрыве зарядов взрывчатого вещества массой  $G = 0,1 \div 1$  кг, помещенных в объем жидкости, ограниченный эластичной оболочкой. Капсуляция жидкости в эластичной оболочке повышает сжимаемость среды, передающей энергию продуктов взрыва в воздух, и способствует существенному уменьшению амплитуды воздушной ударной волны на приведенном расстоянии  $R/G^{1/3} = 0,63 \div 6,8$  м/кг<sup>1/3</sup>. Эффективность ослабления воздушных волн при погружении заряда взрывчатого вещества в жидкость с эластичной оболочкой сопоставима с эффективностью демпфирования взрывных волн газонаполненными двухфазными системами. Показано, что основным параметром ослабления взрывных волн является отношение масс жидкости и заряда взрывчатого вещества, а не такие свойства жидкости, как ее вязкость и плотность.

### ВВЕДЕНИЕ

На протяжении длительного времени не ослабевает интерес к поиску методов и способов подавления уровня взрывных нагрузок, создаваемых при взрывах зарядов взрывчатого вещества (ВВ). Подобные решения находят разнообразные полезные применения при проведении взрывных работ (резка, сварка и разделка разнообразных конструкций и сооружений [1–13]). В последнее время этот интерес усилился в связи с необходимостью безопасного уничтожения взрывоопасных предметов, размещаемых с террористическими целями в густонаселенной местности или замкнутых помещениях. При проведении специальных операций в районах боевых действий одной из главных задач также считается защита людей от фугасных и осколочных поражений при разминировании предохранительных сооружений специального назначения [14]. Сейчас установлено [1–13], что при проведении взрывных работ с использованием энергии зарядов конденсированных ВВ весьма эффективным средством защиты от фугасного поражения является размещение взрывных источников в объеме газосодержащих многофазных сред [1–3] или в газонаполненных оболочках [4–13]. В качестве многофазной среды, окружающей заряд ВВ, использовалась водно-механическая пена плотно-

стью  $\sigma = 2 \div 20$  кг/м<sup>3</sup> при гашении взрывных волн в воздухе [2–9] или взвесь пузырьков газа в жидкости плотностью  $900 \div 990$  кг/м<sup>3</sup> при гашении взрывных волн в воде [3] от зарядов ВВ (тротил, гексоген) массой  $0,1 \div 3$  кг. Взрывогающие газонаполненные оболочки изготавливали с использованием разнообразных пористых материалов: слюда [1], стекловата и мотки металлической проволоки [10], снег и песок [13], пенополиуретан [15].

Анализ эффективности защиты от фугасного поражения при размещении зарядов ВВ в газонаполненных оболочках может быть выполнен на основе сравнения амплитуд взрывных волн от открытого заряда ( $\Delta p_1 = p_1 - p_0$ ) и от зарядов в защитной оболочке ( $\Delta p_2 = p_2 - p_0$ ) в дальней зоне взрыва, т. е. на приведенном расстоянии  $R^* = R/G^{1/3} > 10$  м/кг<sup>1/3</sup>. Здесь  $G$  — масса ВВ,  $R$  — расстояние,  $p_0$  — начальное давление,  $p_1$  — давление во взрывной волне при взрыве в воздухе,  $p_2$  — максимальное давление в волне при взрыве заряда в защитной оболочке. Для водно-воздушных пен плотностью  $2 \leq \sigma \leq 20$  кг/м<sup>3</sup> предельная достигнутая степень ослабления взрывных волн по амплитуде  $K_{\max} = \Delta p_1 / \Delta p_2$  согласно [12, 13] составила

$$\begin{aligned} \Psi_{\max,1} &= 20 \lg[\Delta p_1 / \Delta p_2] = \\ &= 0,366[R_f / R_0] - 0,19 \text{ [дБ]}. \end{aligned}$$

Здесь  $R_0$  — радиус заряда ВВ,  $R_f$  — радиус пенной оболочки вокруг заряда. Величина  $\Psi_{\max,1}$  не зависела от расстояния при  $8 < R^* < 10^3$  м/кг<sup>1/3</sup>. Для газонаполненных оболочек с неводными гранулированными наполнителями независимо от их теплофизических свойств в [8–10, 12, 13] получено  $\Psi_{\max,2} = (3Z - 4) \pm 2$  [дБ]. Здесь  $Z = (V\sigma/G)^{1/3}$ ,  $\sigma$  — эффективная плотность гранулированного или пористого материала,  $V$  — объем оболочки, т. е.  $V\sigma$  — масса каркаса из пористого материала. Обычно  $\sigma$  существенно меньше истинной плотности материала частиц каркаса.

Достигнутая в испытаниях степень ослабления по амплитуде  $K_{\max} \leq 12 \div 15$  весьма далека от теоретически возможной при полном завершении тепловых, фазовых и кинематических обменных процессов между продуктами взрыва ВВ и наполнителем защитной оболочки [2, 3, 12, 13, 16]. Оказалось, что при ослаблении взрывных волн защитными оболочками решающая роль принадлежит инерционности и сжимаемости материала наполнителя. Во всех цитированных исследованиях сжимаемость наполнителей обеспечивалась применением пористых газонаполненных материалов. Сжимаемость таких материалов можно характеризовать скоростью распространения в них малых возмущений давления или равновесной скоростью звука  $D$ . В несжимаемой среде  $D \rightarrow \infty$ , в воде  $D = c_f \approx 1450$  м/с, где  $c_f$  — скорость звука в жидкости. В водно-воздушной пене  $D < c_g$  [3], где  $c_g$  — скорость звука в газе — наполнителе ячеек пены. Во взвеси пузырьков газа в жидкости имеем  $D < c_f$  и даже  $D < c_g$  [2, 3, 16].

### ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Обнаруженные в [1–13] особенности ослабления фугасных эффектов взрыва ВВ газонаполненными оболочками открывают дополнительные возможности в разработке новых типов защитных устройств. Это актуально, поскольку оперативное применение пенных оболочек затруднено седиментацией пены, а изготовление защитных оболочек с иными наполнителями сопряжено с рядом технических трудностей, частично упоминаемых в [4–10]. Рассмотрим вопрос о повышении сжимаемости сплошной жидкости (например, воды) за счет ее капсуляции в эластичной сжимаемой оболочке. Решение такой задачи известно, и в каче-

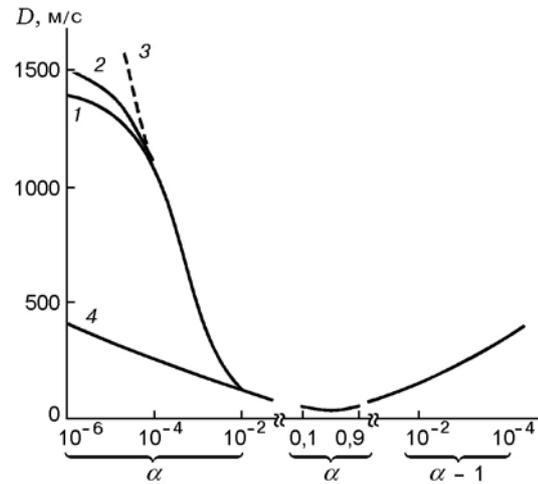


Рис. 1. Зависимость равновесной скорости звука от объемной доли газовых включений в системе «жидкость + газ + непроницаемая оболочка» по [16]:

1 — вода в стальной трубе при  $E = 200$  ГПа, 2 — вода ( $c_f = 1450 \div 1500$  м/с) при  $E \rightarrow \infty$ , 3 — несжимаемая жидкость ( $c_f \rightarrow \infty$ ) в несжимаемой оболочке ( $E \rightarrow \infty$ ), 4 — вода в оболочке из эластичного материала с  $E = 1$  ГПа

стве примера возьмем систему «вода + пузырьки воздуха» в непроницаемой оболочке (для простоты — в трубе) с податливыми стенками [16]. Скорость звука в такой системе определяется по соотношению

$$D^2 = (\alpha\rho_g + (1 - \alpha)\rho_f)^{-1} \times \left( \frac{\alpha}{p} + \frac{1 - \alpha}{\rho_f c_f^2} + \frac{2\Theta r}{Et} \right)^{-1}.$$

Здесь  $\alpha$  — объемная доля пузырьков газа в жидкости,  $\rho_g$  — плотность газа,  $\rho_f$  — плотность жидкости,  $p$  — давление,  $E$  — модуль упругости материала оболочки (стенки трубы),  $\Theta$  — коэффициент, характеризующий условия закрепления оболочки ( $\Theta = 1 - 0,5\mu$  для трубы, закрепленной с одного конца, и  $\Theta = 1 - \mu^2$  для трубы, заземленной с обоих концов,  $\mu$  — коэффициент Пуассона),  $t$  — толщина стенки оболочки (трубы),  $r$  — радиус оболочки (трубы).

Параметрическая зависимость  $D(\alpha)$  представлена на рис. 1 для практически интересной системы «вода + пузырьки воздуха» при  $p = 1$  бар и  $2\Theta r/t = 10$ . Как видно, при  $\alpha \leq 10^{-2}$  скорость звука  $D$  регулируется упругостью материала стенок оболочки. При объемной доле газовых включений в жидкости  $\alpha \geq$

$10^{-2}$  или, точнее,  $\alpha \geq \Delta p / \rho_f c_f^2$  сжимаемость конструкции «оболочка + жидкость + газовые поры» не зависит от свойств наполнителя и материала стенок оболочки. Здесь  $\Delta p$  — амплитуда возмущения давления. Рис. 1 позволяет понять основную особенность подавления взрывных волн от зарядов ВВ газонаполненными оболочками в [1–13, 15]. Во всех опытах [1–13, 15] объемная доля газовых пор в жидкости составила  $\alpha \geq 10^{-2}$ , так что роль свойств жидкости и параметров материала оболочки в определении сжимаемости среды, передающей волну давления, несущественна. Как следует из рис. 1, высокая сжимаемость передающей среды может быть достигнута не только за счет внесения газовых включений в воду, но и (при  $\alpha \leq 10^{-2}$ ) за счет капсуляции воды в эластичную оболочку с  $E < 10$  ГПа.

### ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эффективность снижения фугасного эффекта при размещении зарядов ВВ в объеме жидкости, ограниченном эластичной оболочкой, исследовалась в серии полигонных испытаний, методика которых предварительно опробована в [17, 18]. В опытах измерялись параметры воздушных взрывных волн при наземном взрыве сферических зарядов тротила массой 0,1 и 1 кг. Для того чтобы исключить гашение взрывных волн за счет потерь энергии на взаимодействие с грунтом (образование воронки, унос части энергии с волной в грунт), заряды ВВ устанавливали на плите из броневой стали размером  $1,2 \times 1,2$  м. Толщина плиты в разных опытах изменялась от 30 до 60 мм. Все подрывы выполнены на открытой местности.

Параметры воздушных взрывных волн измерялись шестью пьезоэлектрическими обтекаемыми датчиками давления, расположенными на известном удалении от заряда ( $R$ ) по двум взаимно перпендикулярным направлениям. При взрыве зарядов ТНТ массой 0,1 кг датчики устанавливали на высоте 0,1 м над грунтом на расстоянии от заряда  $R = 0,8; 1,1$  и 1,5 м. При взрыве зарядов ТНТ массой 1 кг датчики находились на расстоянии  $R = 1,5; 2,25; 2,72$  и 3,7 м на высоте 1 м для исключения влияния отраженных волн. В приведенных переменных Гопкинсона — Садовского  $R^* = R / (2G)^{1/3}$  при наземном взрыве зарядов массой 0,1 кг  $1,36 < R^* < 6,8$  м/кг<sup>1/3</sup>, а для зарядов массой 1 кг  $0,63 < R^* < 3,2$  м/кг<sup>1/3</sup>. Результаты изме-

рений амплитуды волн давления от открытых зарядов с точностью не менее  $\pm 10\%$  совпали с эмпирическими значениями, полученными по формулам Садовского [19], которые использовались для дальнейшего сопоставления с параметрами волн от защищенных зарядов.

Капсуляция зарядов достигалась за счет их размещения в двойной цилиндрической эластичной оболочке, наполненной рабочей жидкостью. Размеры внутренней цилиндрической полости объемом  $\approx 2,6$  л: диаметр 0,15 м, высота 0,15 м. Полость окружена кольцевым слоем наполнителя толщиной 0,04 м в оболочке. Суммарный объем наполнителя  $\approx 5,2$  л.

Взрывопоглотители для зарядов массой 0,1 кг ТНТ находились в оболочке из листового полиэтилена толщиной  $t = 2$  мм с предельным осевым удлинением  $\approx 400\%$ . Масса оболочки 0,6 кг. Ряд опытов с зарядами ТНТ массой 1 кг проведен в резиновой оболочке ( $t = 2$  мм) с массой воды 50 кг. Предельное осевое удлинение резины  $\approx 400\%$ . Ограничение эластичности резиновой оболочки достигалось при покрытии ее снаружи твердеющим слоем пенополиуретана. Основные сведения об использованных взрывопоглотителях представлены в таблице: материал оболочки и наполнителя, скорость звука в наполнителе  $c_f$ , абсолютная плотность жидкого наполнителя  $\rho_f$ , акустическое сопротивление наполнителя  $(\rho c)_f$ , параметр  $(M/G)^{1/3}$  ( $M$  — масса наполнителя,  $G$  — масса заряда ВВ), параметр  $\Psi_{\max,2}$ , степень ослабления взрывных волн по амплитуде  $K$ .

При наполнении оболочек жидкостями не предпринималось специальных мер для их дегазации. В качестве рабочих жидкостей взяты вода, водный раствор хлористого кальция, глицерин. Раствор хлористого кальция использовали для изменения плотности жидкости. Глицерин служил образцом высоковязкой жидкости. Ряд опытов выполнен с песком в качестве наполнителя.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Общее представление об изменении параметров взрывных волн при размещении зарядов ВВ в газонаполненной оболочке или их установке в объеме жидкости с эластичной оболочкой дает рис. 2. Линия 1 и точки получены для открытых зарядов соответственно расчетом по [19] и в опытах. Линия 2 — дан-

№ п/п	Материал оболочки	Наполнитель	$c_f$ , м/с	$\rho_f$ , кг/м <sup>3</sup>	$(\rho c)_f$ , 10 <sup>6</sup> кг/(м <sup>2</sup> · с)	$(M/G)^{1/3}$	$\Psi$ , дБ	$K$	$K^{-1}$
1	Полиэтилен	Раствор хлористого кальция	1450	1290	1,87	4,02	8,1 ± 2	2,05–3,25	0,31–0,48
2	Полиэтилен	Глицерин	1920	1260	2,42	3,95	7,8 ± 2	1,96–3,1	0,32–0,51
3	Полиэтилен	Вода	1450	1000	1,45	3,72	7,1 ± 2	1,81–2,87	0,35–0,55
4	Полиэтилен	Песок	—	1810	—	4,53	9,6 ± 2	2,27–3,79	0,26–0,42
5	Резина	Вода	1450	1000	1,45	3,68	7,0 ± 2	1,79–2,83	0,35–0,56
6	Резина + пенополиуретан	Вода	1450	1000	1,45	3,72	7,1 ± 2	1,81–2,87	0,35–0,55

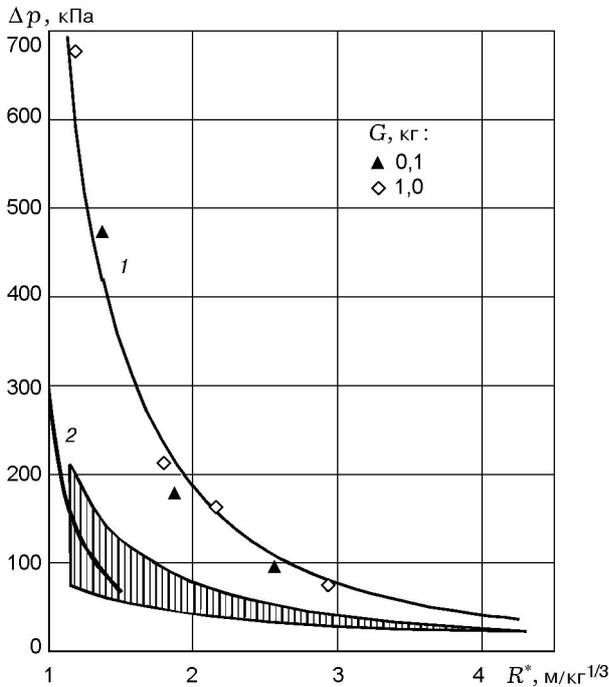


Рис. 2. Зависимость амплитуды воздушной взрывной волны от приведенного расстояния: 1 — расчет по [19], 2 — по [2, 3], точки — по измерениям для открытого заряда; заштрихованная область — заряды в эластичных жидкостных взрывоподавителях

ные работ [2, 3] для взрыва тротила в водно-воздушной пене при  $\sigma \approx 10$  кг/м<sup>3</sup>. Заштрихованная полоса значений отвечает описанной серии опытов с зарядами ВВ, погруженными в жидкость в эластичных оболочках, и данным [17, 18]. Как видно, эффективность ослабления ударных волн с помощью пены оказывается сопоставимой с эффективностью ослабления волн жидкостью в эластичной оболочке.

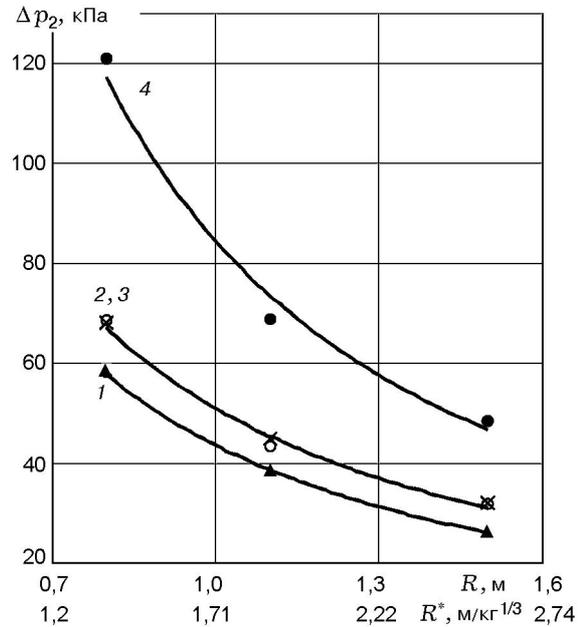


Рис. 3. Зависимость амплитуды воздушной взрывной волны от расстояния для различных вариантов взрыва 0,1 кг тротила: номера кривых соответствуют номерам взрывоподавителей в таблице

Рис. 3 детально иллюстрирует влияние различных взрывопоглотителей на зависимость амплитуды взрывных волн от расстояния (использована аппроксимация степенной функцией). Как видно, все жидкостные взрывопоглотители обладают примерно одинаковой (в пределах ошибки измерений ±10 %) эффективностью. В опытах с песком получена наименьшая степень ослабления взрывных волн. Меньшая сжимаемость глицерина по сравнению с водой (скорость звука  $D = 1920$  м/с вместо 1450 м/с для воды) компенсирует влияние

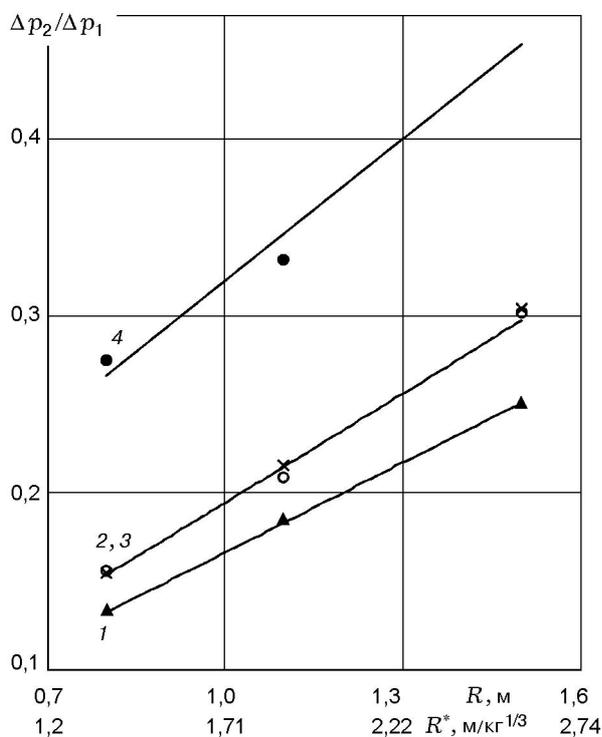


Рис. 4. Зависимость степени ослабления воздушной ударной волны от расстояния при наземном взрыве 0,1 кг тротила:

номера кривых соответствуют номерам взрывоподавителей в таблице

большей плотности. На рис. 4 построен график зависимости степени ослабления взрывных волн по амплитуде от расстояния  $K_e^{-1} = \Delta p_2 / \Delta p_1 = K_e^{-1}(R^*)$ . При взрыве ВВ в объеме жидкости величина  $K$  не убывает с расстоянием в пределах до  $R^* \leq 3,1 \text{ м/кг}^{1/3}$ . В таблице для сравнения с нашими экспериментальными данными приведены расчетные значения  $\Psi_{\text{max},2}$  для газонаполненных оболочек. Можно отметить хорошее согласие расчетных величин  $K$  (с учетом декларированного разброса результатов измерений) с определенными в опытах значениями  $K_e$ .

Результаты измерений амплитуды волн от взрыва зарядов ВВ массой 1 кг, помещенных в воду, удерживаемую в неупрочненной (линии 1) или упрочненной (линия 2) резиновой оболочке, представлены на рис. 5 в сравнении с данными для открытого заряда. Частично подтверждается вывод о влиянии эластичности оболочки на формирование воздушных волн. Полезно дополнить рис. 5 результатами расчетов по [20] для системы «заряд ВВ (мас-

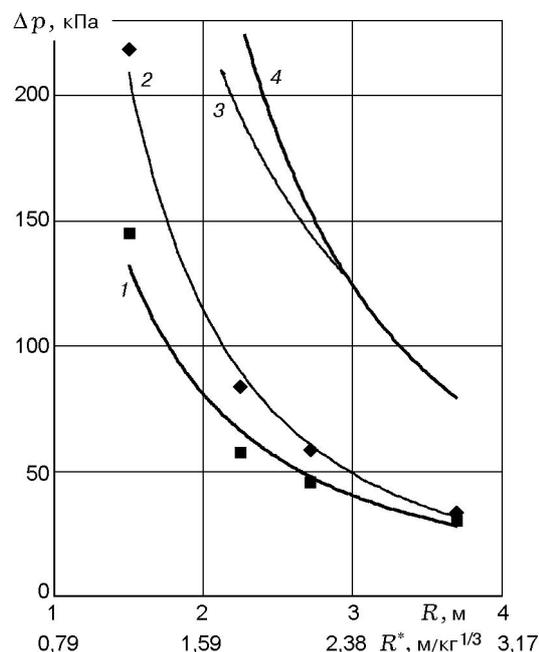


Рис. 5. Зависимость амплитуды воздушной ударной волны от расстояния при наземном взрыве 1 кг тротила:

1 — опыт с взрывоподавителем 5, 2 — с взрывоподавителем 6, 3 — расчет по [20], 4 — расчет по [19]

сой 0,45 кг) + водяная ванна + тонкая оболочка из алюминиевого сплава ( $E \approx 70 \text{ ГПа}$ )» (линия 3). При соотношении масс воды и заряда ВВ от 2,1 до 16 в расчетах [20] при  $R/R_0 > 30$  не обнаружено заметного снижения амплитуды взрывных волн. Это еще раз подтверждает, что при выборе эффективных демпферов фугасных нагрузок следует учитывать эластичность оболочки. Формулы для расчета степени ослабления  $K$  по амплитуде ударных волн для газонаполненных оболочек неприменимы к случаю, описанному в [20], когда заряд ВВ, утопленный в жидкости, помещен в металлическую оболочку.

## ВЫВОДЫ

Прямыми экспериментальными измерениями показано, что эффективность ослабления взрывных волн по амплитуде давления при наземных взрывах зарядов тротила массой до 1 кг с помощью жидкостно-емкостных контейнеров с эластичными стенками сравнима с таковой при применении газонаполненных оболочек или объемов водно-механической пены.

Определяющим параметром при ослаблении взрывных нагрузок является соотношение массы ВВ и суммарной массы жидкости и эластичной оболочки. Основную роль в подавлении воздушной волны, по-видимому, вносят потери энергии на кинетический разгон жидкости, чему способствует эластичность стенок контейнера. Теплоотвод от продуктов взрыва на разогрев и вероятное испарение жидкости недостаточен для дополнительного ослабления взрывных волн.

Для получения полной картины ослабления поражающего действия возмущений давления от взрыва ВВ, помещенного в защитный жидкостно-эластичный контейнер, необходимо выполнить измерения импульса статического давления и длительности положительной фазы сжатия. Для дальнейшего совершенствования защитных средств необходимо построение диаграмм «давление — импульс» вместе с описанием трансформации профиля взрывной волны в координатах «давление — время» на любом удалении от заряда по сравнению со стандартными диаграммами для открытого заряда.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Wodsworth J.** Attenuating blast waves produced by an instantaneous release of thermal energy // *Nature*. 1964. V. 204, N 4959. P. 673.
2. **Кудинов В. М., Паламарчук Б. И., Гельфанд Б. Е., Губин С. А.** Параметры ударных волн при взрыве заряда ВВ в пене // *Докл. АН СССР*. 1974. Т. 228, № 4. С. 555–558.
3. **Borisov A. A., Gelfand B. E., Kudinov V. M. et al.** Shock waves in water foams // *Acta Astronaut.* 1978. V. 5, N 11–12. P. 1027–1033.
4. **Raspet R., Butler P. B., Yahani F.** The reduction of blast overpressure from aqueous foam in a rigid confinement // *Appl. Acoust.* 1987. V. 22, N 1. P. 35–45.
5. **Raspet R., Butler P. B., Yahani F.** The effect of material properties on reducing intermediate blast noise // *Appl. Acoust.* 1987. V. 22, N 3. P. 243–259.
6. **Raspet R., Griffiths S. K.** The reduction of blast noise with aqueous foam // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1983. V. 74, N 6. P. 1757–1763.
7. **Powers J. M., Krier H.** Blast waves attenuation by cylindrical reflecting barriers // *UILU ENG-84-4014*. 1984.
8. **Panczak T. D., Butler P. B., Krier H.** Shock propagation and blast attenuation through aqueous foams // *J. Haz. Mater.* 1987. V. 14, N 4. P. 321–336.
9. **Evans D. L., Jancovski D. F., Hirlemen E. D.** A preliminary investigation of aqueous foam for blast attenuation // *ERS R-78050*. 1979.
10. **Powers J. M., Krier H.** Attenuation of blast waves when detonating explosives inside barriers // *J. Haz. Mater.* 1987. V. 13, N 1. P. 121–133.
11. **Clark P. R., Hubbard P. J., Lee P. R., Woodman H. C.** The reduction of noise levels from explosive tests facilities using aqueous foams // *NSWC-WO TR 77-36*. 1977.
12. **Паламарчук Б. И.** Об энергетическом подобию затухания ударных волн // *Применение энергии взрыва в сварочной технике*. Киев: ИЭС АН УССР, 1989. С. 157–167.
13. **Паламарчук Б. И., Постнов А. В.** Затухание ударных волн при взрыве ВВ, помещенных в газосодержащие оболочки // *Применение энергии взрыва в сварочной технике*. Киев: ИЭС АН УССР, 1989. С. 39–41.
14. **Kleine H., Makris A.** Development of blast protection equipment // *Proc. Symp. on Shock Wave Japan*. 2000. Tokyo Univ., 2000. P. 661–674.
15. **Kleine H., Disconescu K., Lee J. H. S.** Blast wave propagation in foam // *Proc. 20th Symp. (Intern.) on Shock Waves / B. Sturtevant, J. E. Shepherd, H. Hornung. (Eds).* Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Sci., 1996. V. 2. P. 1351–1356.
16. **Mori Y., Hijikata K., Komine A.** Propagation of pressure waves in two phase flow // *Intern. J. Multiphase Flow*. 1975. V. 1, N 1. P. 139–152.
17. **Сильников М. А., Михайлин А. И., Орлов А. В., Садырин А. И.** Влияние параметров жидкостно-емкостного контейнера, изолирующего заряд ВВ, на давление ударной волны при взрыве // *Тр. 2-й конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности»*. СПб.: НПО Спецматериалов, 1999. Т. 2. С. 189–190.
18. **Сильников М. А., Михайлин А. И., Орлов А. В., Садырин А. И.** Моделирование деформации жидкостно-емкостного эластичного контейнера при взрыве заряда ВВ // *Тр. 2-й конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности»*. СПб.: НПО Спецматериалов, 1999. Т. 2. С. 190–198.
19. **Садовский М. А.** Механическое действие воздушных ударных волн по данным экспериментальных исследований // *Физика взрыва*. М.: АН СССР, 1952. № 1. С. 20–111.
20. **Fry M.** Interpretation of shock waves from encapsulated high explosive charge // *Proc. 18th Symp. (Intern.) on Shock Waves / Takayama K. (Ed.)*. Heidelberg, Tokyo, London: Springer Verlag, 1992. V. 2. P. 901–904.

Поступила в редакцию 14/VII 2000 г.