

## Экспериментальная оценка параметров поля давления при подводном взрыве фугасных и кумулятивных зарядов с помощью пьезоэлектрических датчиков

© С.В. Ладов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

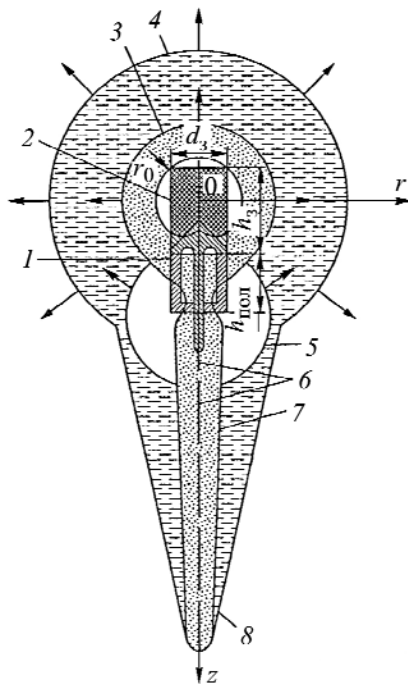
*Рассмотрены методика и результаты измерения параметров взрывных и баллистических ударных волн, возникающих при взрыве в воде фугасных и кумулятивных зарядов. При этом определены параметры поля давления и импульса при движении ударных волн проводилось в условиях безграничной жидкости. Приведены сравнительные экспериментальные результаты лабораторных опытов и полигонных испытаний в зависимости от расстояния до центра массы заряда и направления установки датчиков относительно оси заряда. Получены аппроксимирующие зависимости для определения значений максимальных давлений и удельных импульсов на фронтах взрывных и баллистических ударных волн при взрыве фугасных и кумулятивных зарядов. Представлены схема замера поля давления и типичные осциллограммы в точке установки датчиков. Полученные результаты могут быть использованы при оценке возможностей разрушения подводной преграды при фугасном и кумулятивно-фугасном действиях взрыва.*

**Ключевые слова:** фугасный заряд, кумулятивный заряд, кумулятивная струя, взрывная ударная волна, баллистическая ударная волна, кумулятивно-фугасное действие, поле давления, удельный импульс, пьезоэлектрический датчик

**Введение.** В настоящее время достаточно подробно исследован подводный взрыв цилиндрического заряда взрывчатого вещества (ВВ) с плоскими торцами, который принято называть фугасным зарядом (ФЗ) и который обеспечивает образование и распространение взрывной ударной волны (ВУВ) и гидропотока (сильно сжатая продуктами взрыва среда) [1–5]. Менее исследован подводный взрыв цилиндрического заряда ВВ с конической или полусферической металлической облицовкой, вставленной в выемку на торце, противоположном месту инициирования, который принято называть кумулятивным зарядом (КЗ) [6–8]. При этом наряду с ВУВ образуются и распространяются кумулятивная струя (КС) и баллистические ударные волны (БУВ) [7, 8].

Известно, что при действии фугасных и кумулятивных зарядов на подводные конструкции, представляющие собой жестко закрепленные металлические преграды конечной толщины, за которыми находится герметичная воздушная полость, их разрушающий эффект будет неодинаков [9–14]. При этом определяющее значение имеют давление на фронте ударной волны и импульс, передаваемые преграде.

Если при использовании ФЗ преграда начинает деформироваться и затем разрушаться под действием проходящей ВУВ и движущегося



**Рис. 1.** Качественная картина процесса взрыва КЗ в воде:

1 — воздушная полость; 2 — КЗ; 3 — газовый пузырь; 4 — ВУВ; 5 — вторичная ударная волна; 6 — элементы КС; 7 — кумулятивная каверна; 8 — огибающая фронта ВУВ;  $h_{\text{пол}} = 1,5d_3$  — высота воздушной полости;  $d_3, h_3$  — диаметр и высота заряда ВВ;  $r_0$  — приведенный к сферическому радиусу заряда ВВ

ударных волн при взрыве в воде кумулятивных и фугасных (для сравнения) зарядов. При изготовлении датчиков в качестве пьезоэлемента использовался турмалин [15, 16]. Замеры параметров взрывных и баллистических ударных волн осуществлялись на разных расстояниях и по разным направлениям (рис. 2). На рисунке также приведены типичные осциллограммы процесса, зафиксированные осциллографом марки ОК-17. Методика замера давления с помощью пьезодатчиков и возможная блок-схема электронной установки подробно представлены в работах [15–18]. Точность замеренных параметров составляла 10...15 %.

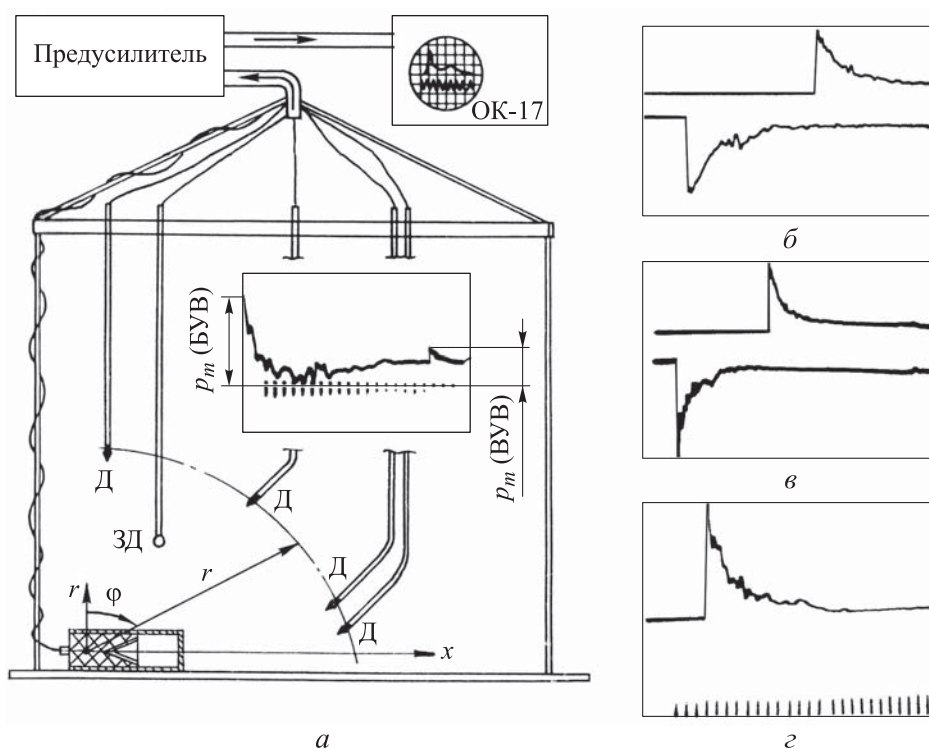
При проведении лабораторных и полигонных экспериментов использовались в основном цилиндрические кумулятивные и фугасные заряды диаметрами от 20 до 95 мм и массой заряда ВВ из ГФГ-2 и А-IX-I (флегматизированный гексоген) или смеси ТГ 50/50 (смесь

потока жидкости (гидропотока), то в случае применения КЗ в процессе деформирования и последующего разрушения преграды также участвуют КС и генерируемые ее элементами БУВ. На рис. 1 представлена качественная картина процесса взрыва в воде КЗ 2, при котором зафиксированы ВУВ 4; газовый пузырь 3 от расширяющихся продуктов детонации; элементы КС 6, образующиеся при схлопывании кумулятивной облицовки; кумулятивная каверна 7 в воде от движения КС; огибающая фронта БУВ 8, которая формируется из отдельных волн, возникающих при ударе элементов струи о воду, и вторичная ударная волна 5, связанная с наличием воздушной полости 1 для нормального формирования КС [7, 8].

Цель данной работы — изложить результаты измерений параметров ударных волн, выполненных с помощью пьезоэлектрических датчиков, при взрыве в воде фугасных и кумулятивных зарядов.

**Экспериментальные исследования.** Рассмотрим результаты проведенных с помощью пьезоэлектрических датчиков измерений параметров

тротил — гексоген) от 7,5 до 1300 г, их основные характеристики приведены в табл. 1. При этом во всех КЗ использовались медные конические облицовки постоянной (варианты 3, 5 и 8) или переменной (варианты 1 и 6) толщины, а в вариантах 1 и 3 форма заряда ВВ была цилиндро-конической.



**Рис. 2.** Схема замера поля давления (а) и вид тарировочных (б, в) осциллограмм и осциллограммы калиброванного эталонного сигнала (з):  
Д — датчик давления; ЗД — запускающий датчик

Таблица 1

**Характеристики кумулятивных и фугасных зарядов**

Номер варианта	Тип заряда	Тип ВВ	Масса ВВ, г	Диаметр заряда, мм	Высота заряда, мм	Угол раствора конуса, град	Толщина облицовки, мм
1	КЗ	ГФГ-2	7,5	22	21	75	0,5/0,6
2	ФЗ	А-IX-1	7,5	20	15	—	—
3	КЗ	А-IX-1	29,5	36	34	60	0,8
4	ФЗ	А-IX-1	29,5	25	36	—	—
5	КЗ	А-IX-1	200	46	88	43,5	1,5
6	КЗ	А-IX-1	200	46	88	43,5	1,2/2,2
7	ФЗ	А-IX-1	200	46	73	—	—
8	КЗ	ТГ 50/50	1300	95	140	44	2,5
9	ФЗ	ТГ 50/50	1300	95	110	—	—

Изучение поля давления при взрыве КЗ осуществлялось измерением максимального давления  $p_m$  на фронте УВ на четырех фиксированных расстояниях  $r$  от центра массы заряда ( $r_1 = 1$  м,  $r_2 = 0,75$  м,  $r_3 = 0,5$  м,  $r_4 = 0,3$  м) при полигонных испытаниях (см. табл. 1, варианты 5–9) и трех фиксированных расстояниях ( $r_1 = 0,22$  м,  $r_2 = 0,15$  м,  $r_3 = 0,09$  м) при лабораторных опытах (см. табл. 1, варианты 1–4). При подрыве КЗ датчики устанавливались под углом  $\varphi$  от оси  $Or$  к оси  $Ox$  (см. рис. 2) по следующим направлениям:

– в направлении оси  $Or$ , перпендикулярном направлению движения КС ( $\varphi = 0$ );

– практически вдоль оси  $Ox$  направления движения КС (реально измерения проводились при угле  $\varphi = 75^\circ$ , а не при угле  $\varphi = 90^\circ$ , так как в противном случае датчики разрушались при попадании в них элементов КС);

– под некоторым углом от направления оси  $Or$  ( $\varphi = 45^\circ$  и  $\varphi = 60^\circ$ ).

При подрыве ФЗ датчики устанавливались под углами  $\varphi = 0$  и  $\varphi = 90^\circ$ .

Типичная осциллограмма процесса взрыва в воде КЗ при установке датчика под углом  $\varphi = 75^\circ$ , на которой фиксируется всплеск от действия сначала БУВ (слева), а затем и основной ВУВ (справа), представлена на рис. 2 в центре схемы. Видно, что затухание БУВ происходит значительно быстрее, чем основной ВУВ, однако их импульсы (площадь под кривой  $p = p(t)$ ) соизмеримы. Тарировочные кривые для определения параметров ударных волн, полученные при взрыве ФЗ, показаны на отдельных осциллограммах (рис. 2, б, в). Обработка осциллограмм проводилась с учетом коэффициента усиления соответствующих каналов осциллографа путем наложения на экран калиброванного эталонного сигнала (рис. 2, г). Вторичные ударные волны, фиксируемые на осциллограммах в виде небольших всплесков, есть результат ударов отдельных элементов КС о воду при выходе из воздушной полости. Результаты обработки экспериментов показали, что на всех осциллограммах для различных типов КЗ амплитуда максимального давления на фронте БУВ примерно в 1,2–1,5 раза больше амплитуды на фронте ВУВ.

Известно, что основными характеристиками взрыва, определяющими его механическое действие на преграду, являются давление  $p$  и импульс  $J$  ударной волны, причем давление в функции времени после прихода фронта ударной волны обычно аппроксимируется выражением [1–4]

$$p = p_m e^{-t/\theta}, \quad (1)$$

где  $p_m$  — максимальное давление на фронте ударной волны;  $\theta$  — постоянная времени экспоненциального затухания.

Анализ обработки полученных осциллограмм показал, что приведенная выше экспоненциальная зависимость с точностью до экспериментальных данных описывает форму спада давления для фронта ВУВ. В то же время для основной ВУВ данное приближение хорошо описывает форму волны для давлений, больших  $1/3p_m$ . При этом хвостовая часть волны затухает медленнее, чем это следует из приведенного экспоненциального приближения.

Результаты полигонных экспериментов для фугасных и кумулятивных зарядов массой 200 г (см. табл. 1, варианты 5 и 7) приведены в табл. 2. С учетом этих данных и значений, полученных для лабораторных зарядов (см. табл. 1, варианты 1–4), на рис. 3 нанесены экспериментальные точки, по которым затем построены аппроксимирующие кривые для оценки максимального давления  $p_m$  в зависимости от приведенного расстояния  $\bar{r} = r/r_0$  для различных направлений установки датчиков, где  $r_0$  — приведенный к сферическому радиусу заряда ВВ.

Таблица 2

**Параметры максимального давления на фронте ударных волн при взрыве в воде**

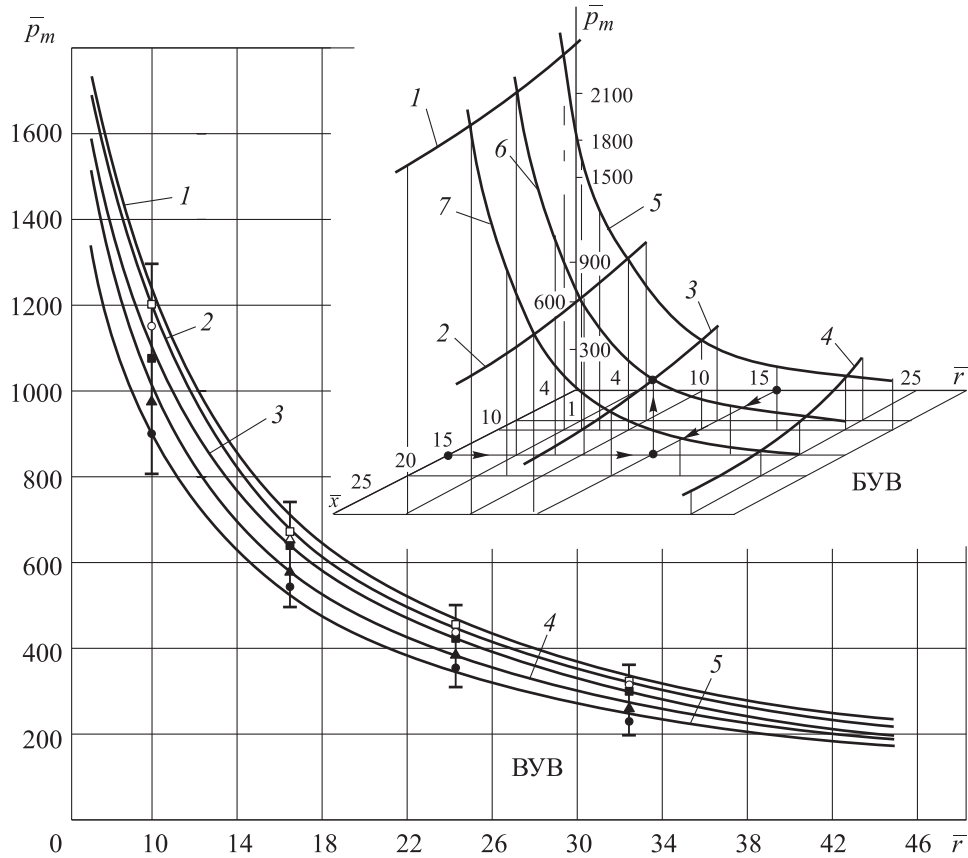
$r, \text{ м}$	Значения давления на фронте ВУВ и БУВ в различных точках установки датчиков $p_m, 10^{-5} \text{ Па}$								
	ВУВ ФЗ		ВУВ КЗ				БУВ КЗ		
	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 90^\circ$	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 45^\circ$	$\varphi = 60^\circ$	$\varphi = 75^\circ$	$\varphi = 45^\circ$	$\varphi = 60^\circ$	$\varphi = 75^\circ$
0,3	1150	1200	1150	1075	980	900	1200	1250	1500
0,5	650	675	650	640	600	550	720	790	1200
0,7	425	440	430	425	390	360	300	600	900
1,0	305	310	300	290	250	230	–	–	–

При этом максимальное давление на фронте подводной ВУВ при взрыве КЗ в диапазоне приведенных расстояний  $7 < \bar{r} < 45$  и направлений  $0 < \varphi < 75^\circ$  достаточно хорошо аппроксимируется зависимостью вида

$$\bar{p}_m = \frac{15 \cdot 10^3}{\bar{r}^{1,1}} \cdot (\cos \varphi)^{0,2}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  — угол, измеряемый от оси  $Or$  (см. рис. 2);  $\bar{p}_m = p_m/p_0$ ,  $p_0 = 10^5 \text{ Па}$  — нормальное атмосферное давление.

Для сравнения на том же графике (см. рис. 3) нанесены экспериментальные значения для взрыва ФЗ. На нем видно, что параметры максимального давления на фронте основной ВУВ от взрыва КЗ несколько ниже, чем эквивалентного ему по форме и массе ФЗ, причем данная тенденция растет с увеличением угла  $\varphi$ . В случае малых расстояний



**Рис. 3.** Изменение значений максимального давления на фронтах ВУВ и БУВ: слева: 1 — ФЗ,  $\varphi = 0-90^\circ$  ( $\Delta, \square$ ); 2 — КЗ,  $\varphi = 0$  ( $\circ$ ); 3 — КЗ,  $\varphi = 45^\circ$  ( $\blacksquare$ ); 4 — КЗ,  $\varphi = 60^\circ$  ( $\blacktriangle$ ); 5 — КЗ,  $\varphi = 75^\circ$  ( $\bullet$ );  $\Delta, \square, \circ, \blacksquare, \blacktriangle, \bullet$  — эксперимент; справа: 1 —  $\bar{r}^* = 5$ ; 2 —  $\bar{r}^* = 10$ ; 3 —  $\bar{r}^* = 15$ ; 4 —  $\bar{r}^* = 25$ ; 5 —  $\bar{x}^* = 10$ ; 6 —  $\bar{x}^* = 15$ ; 7 —  $\bar{x}^* = 20$

максимальные давления  $p_m$  могут быть определены по результатам оптических съемок скоростных характеристик фронта ударной волны и известных соотношений динамической совместности [2, 5, 8, 18], потому что пьезоэлектрические датчики в этом случае разрушаются. Соответствующие экспериментальные точки и построенные по ним кривые максимального давления  $p_m$  от БУВ при взрыве КЗ в зависимости от приведенных расстояний  $r/r_0$  и  $x/r_0$  вдоль осей  $Or$  и  $Ox$  (см. рис. 2) показаны на рис. 3 в правой верхней части. Полученные данные хорошо аппроксимируются зависимостью вида

$$\bar{p}_m = \frac{1600 + 10 \cdot (\bar{r} - 17)^2}{\bar{x}^{0,035(\bar{r}-0,11)}}, \quad (3)$$

записанной для диапазона изменения значений  $5 < \bar{r} < 45$ ,  $5 < \bar{x} < 25$ . Следует отметить, что максимальное давление для фиксированного

расстояния  $\bar{r}^*$  в направлении оси  $Ox$  падает значительно медленнее, чем соответствующий параметр для направления при фиксированном расстоянии  $\bar{x}^*$ . При этом спад давления по оси  $Ox$  более интенсивен при переходе от головных элементов к элементам в середине и хвосте КС.

Множество кривых в зависимости от значений  $\bar{x}$  и  $\bar{r}$  практически составляет пространственную поверхность распределения давления (см. рис. 3, правую верхнюю часть). Для определения времени прихода фронта БУВ в данную точку пространства необходимо использовать следующее соотношение:

$$\bar{r}_{\text{БУВ}} = \frac{\bar{x}_{\text{КС}}}{(14 \cdot \bar{t}^{-0,84} - 1)^{0,5}}, \quad (4)$$

где значение  $\bar{x}_{\text{КС}}$ , в свою очередь, определяется зависимостями [7, 8]:

$$\bar{x}_{\text{КС}} = 5,1 (c_0 t/r_0)^{0,75} - 1,1 \quad (\text{для КЗ с углами раствора конуса } 30^\circ);$$

$$\bar{x}_{\text{КС}} = 6,5 (c_0 t/r_0)^{0,58} - 2,51 \quad (\text{для КЗ с углами раствора конуса } 60 \dots 75^\circ).$$

Задавая безразмерное время  $\bar{t}^*$ , сначала по вышеприведенным формулам находят величину  $\bar{x}_{\text{КС}}$ , т. е. определяют расположение границы раздела КС — вода. Затем, подставив значение  $\bar{t}^*$  и найденную величину  $\bar{x}_{\text{КС}}^*$  в формулу (4), вычисляют соответствующее значение  $\bar{r}_{\text{БУВ}}$ . После этого по двум точкам находят положение фронта БУВ в данный момент времени (см. рис. 3, правая верхняя часть). Наконец, по формуле (3) определяют величину параметра  $p_m$  вдоль найденного положения фронта.

При реальном взаимодействии КЗ с преградой постоянная времени  $\theta$  экспериментально определялась в зависимости от направления для приведенных расстояний  $\bar{r} > 7$  или  $\bar{x} > 7$ . С учетом известного выражения для определения параметра  $\theta$  при взрыве ФЗ [1, 2] и проведенных исследований можно записать

$$\frac{\theta}{t} = \frac{\eta(\bar{t} + 3,3)^{0,24}}{\bar{t}}, \quad (5)$$

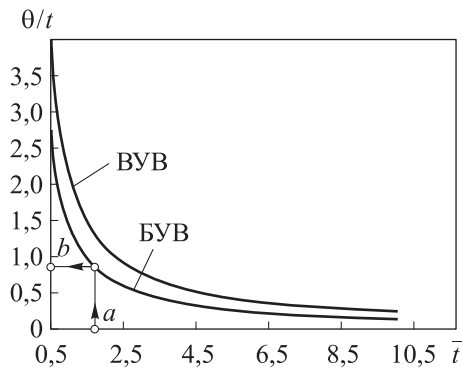
где  $\eta = 1$  для БУВ и  $\eta = 1,5$  для ВУВ.

Форма записи (5) эквивалентна общепринятой формуле

$$\theta = \eta \frac{r_0}{c_0} \bar{r}^{0,24}, \quad (6)$$

однако нахождение данного параметра  $\theta$  удобно проводить графически по схеме, показанной на рис. 4. Задавая величину  $\bar{t} = a$ , сразу

находим значение  $\theta/t = b$ , после чего искомую величину ищем в виде  $\theta = abr_0/c_0$ , где  $a, b$  — безразмерные параметры. По величине максимального давления  $p_m$  и постоянной времени  $\theta$  с учетом формулы (1) может быть построен спад давления во времени в любой точке пространства.



**Рис. 4.** Схема графического определения постоянной времени экспоненциального затухания:

$$\theta = ab \frac{r_0}{c_0}; \quad \frac{\theta}{t} = \frac{\eta(\bar{t} + 3,3)^{0,24}}{\bar{t}}$$

Важным параметром при взрыве КЗ в воде с точки зрения последующего разрушающего действия на преграду является полный импульс взрыва, определяемый выражением

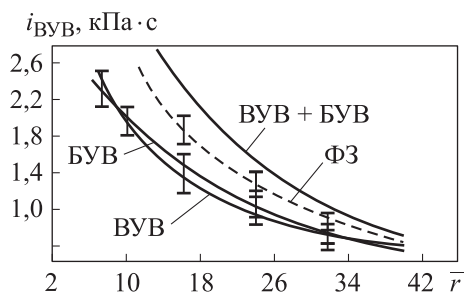
$$J = K i_{\text{ув}} S = K S \int_0^{(5...6)\theta} p(t) dt, \quad (7)$$

где  $K$  — средний интегральный коэффициент, учитывающий характер отражения ударной волны от преграды и зависящий от акустических свойств преграды и окружающей среды, а также от угла падения ударной волны на преграду [1–4];  $i_{\text{ув}}$  — удельный импульс падающей ударной волны;  $S$  — площадь нагружаемой преграды;  $p(t)$  — изменение давления на преграде.

Изменение удельного импульса при взрыве КЗ в безграничной жидкости от расстояния и направления установки датчика для одного из лабораторных зарядов (см. табл. 1, вариант 1,  $r_0 = 10,4$  мм), представленное на рис. 5, для ВУВ в диапазоне  $0^\circ < \varphi < 75^\circ$  хорошо аппроксимируется зависимостью

$$i_{\text{ув}} = \frac{17,7 \cdot 10^5}{\bar{r}^{0,86}} (\cos \varphi)^{0,2}, \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (8)$$





**Рис. 5.** Изменение значений удельного импульса на фронтах баллистических и взрывных ударных волн

При этом для БУВ в пределах действия формулы (3) может быть предложена зависимость вида

$$i_{ув} = \frac{[0,02 \cdot (\bar{r} - 7,7)^2 + 1,8] \cdot 10^5}{\bar{x}^{0,035(\bar{r}-0,11)}}, \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (9)$$

Соответствующий удельный импульс падающей ударной волны  $i_{ув}$  будет определяться суммой удельных импульсов от ВУВ и БУВ (см. рис. 5). При этом суммарный импульс при взрыве КЗ будет больше, чем при действии взрыва эквивалентного по массе ФЗ.

**Заключение.** Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований проанализированы особенности процесса взрыва в воде кумулятивных и фугасных (для сравнения) зарядов. При этом определены параметры на образующихся при взрыве фронтах ВУВ и БУВ, главными из которых являются максимальное давление и удельный импульс, влияющие на последующие деформирование и разрушение подводных преград конечной толщины. Следует отметить, что определение давления и импульса ударных волн проводилось в условиях безграничной (свободной) жидкости. Если поместить в поле действия динамических параметров взрыва какую-либо преграду, то их значения будут изменяться, особенно непосредственно на преграде и вблизи нее. В этом случае необходимо исследовать особенности взаимодействия взрыва КЗ в воде с преградой и вносить соответствующие коррективы в оценку поражающих факторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Коул Р. *Подводные взрывы*. Москва, Изд-во иностранной литературы, 1950, 494 с.
- [2] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. [и др.]. *Физика взрыва: в 2 т. Т. 1*. Л.П. Орленко, ред. Изд. 3-е, испр. Москва, Физматлит, 2004, 832 с.
- [3] Озерецковский О.И. *Действие взрыва на подводные объекты*. Е.С. Шахиджанов, ред. Москва, ФГУП «ЦНИИХМ», 2007, 262 с.

- [4] Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. *Динамические нагрузки при подводном взрыве*. Ленинград, Судостроение, 1967, 387 с.
- [5] Васюков В.И., Дильдин Ю.М., Ладов С.В. Определение параметров гидродинамических полей давления и скоростей при подводном взрыве в безграничной жидкости. В сб.: *Труды МВТУ № 312 «Вопросы физики взрыва и удара»*. Москва, МВТУ, 1980, с. 71–83.
- [6] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Параметры поля течения жидкости при проникании в нее кумулятивной струи. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2002, № 1 (8), с. 73–84.
- [7] Ладов С.В., Бабкин А.В., Васюков В.И., Федоров С.В. Физическая картина и параметры взрыва кумулятивного заряда в безграничной жидкости. *Оборонная техника*, 2002, № 1-2, с. 65–71.
- [8] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Ладов С.В., Орленко Л.П., Федоров С.В. Особенности проникания кумулятивной струи в воду. *Труды Международного семинара «Гидродинамика высоких плотностей энергии»*. Новосибирск, ИГ СО РАН, 2004, с. 561–574.
- [9] Ладов С.В. Возможный механизм разрушения корпуса подводной лодки при взрыве кумулятивного заряда. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2015, вып. 1 (85), с. 54–62.
- [10] Бабкин А.В., Ладов С.В., Орленко Л.П. Деформирование осесимметричной преграды при подводном взрыве кумулятивного заряда. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 2 (86).  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1853>
- [11] Ладов С.В. Деформирование и разрушение подводной преграды при взрыве фугасных и кумулятивных зарядов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 6 (138).  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2279>
- [12] Ладов С.В. Повышение эффективности действия малогабаритных противолодочных торпед. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2016, вып. 1 (91), с. 127–132.
- [13] Ладов С.В. Применение кумулятивно-фугасных боевых зарядных отделений в малогабаритных противолодочных торпедах. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2016, вып. 2 (92), с. 37–42.
- [14] Ладов С.В. Особенности деформирования и разрушения подводной преграды при кумулятивно-фугасном действии взрыва. В кн.: *XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: сб. тезисов докладов: в 4 т.* Санкт-Петербург, Минобрнауки, РАН, СПбУ, 2023, с. 389–390.
- [15] Корчагин В.Н., Васюков В.И., Гладков Н.А. [и др.]. *Исследование ударных процессов с помощью пьезоэлектрических преобразователей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995, 32 с.
- [16] Бабкин А.В., Гелин Д.В., Ладов С.В. [и др.]. *Физика взрыва и удара*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 75 с.
- [17] Ладов С.В. Опыт использования электретных датчиков для замера параметров подводного взрыва непосредственно на преграде. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2021, вып. 2 (117), с. 143–149.
- [18] Андреев С.Г., Бойко М.М., Селиванов В.В. *Экспериментальные методы физики взрыва и удара*. Москва, Физматлит, 2013, 752 с.

Статья поступила в редакцию 03.04.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ладов С.В. Экспериментальная оценка параметров поля давления при подводном взрыве фугасных и кумулятивных зарядов с помощью пьезоэлектрических датчиков. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 4.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2024-4-2349>

**Ладов Сергей Вячеславович** — канд. техн. наук, доцент, член-корр. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 400 научных и учебно-методических работ в области физики взрыва.  
e-mail: ladovsv@bmstu.ru

## Experimental assessment of the pressure field parameters during underwater explosion of the high-explosive and shaped charges using the piezoelectric sensors

© S.V. Ladov

Bauman Moscow State Technical University,  
Moscow, 105005, Russian Federation

*The paper considers methodology and results of measuring parameters of the explosive and ballistic shock waves arising from the high-explosive and shaped charges explosion in water. In this case, parameters of the pressure and momentum fields during the shock waves motion were determined under conditions of the infinite fluid. Experimental results of the laboratory experiments are compared with the field tests, and are presented depending on the distance from the center of mass of the charge and direction of the sensors installation relative to the charge axis. Approximating dependencies are obtained to determine the maximum pressure and specific impulse values at the explosive and ballistic shock waves front during the high-explosive and shaped charges explosion. Diagrams are presented of the pressure field measurement and typical oscillograms at the point of the sensors installation. The results obtained could be used in assessing possibilities of wreaking destruction to an underwater barrier by high-explosive and high-explosive dual-purpose explosions.*

**Keywords:** high-explosive charge, shaped charge, cumulative jet, explosive shock wave, ballistic shock wave, high-explosive dual-purpose action, pressure field, specific impulse, piezoelectric sensor.

### REFERENCES

- [1] Cole R.H. *Underwater explosions*. Dover Publications, 1948 [In Russ.: Koul R. Podvodnye vzryvy. Moscow, Inostranny Literatury Publ., 1950, 494 p.].
- [2] Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A. et al. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. In 2 volumes. Vol. 1. L.P. Orlenko, ed. 3<sup>rd</sup> ed., rev. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 832 p.
- [3] Ozeretskivsky O.I. *Deystvie vzryva na podvodnye obyekty* [The effect of an explosion on underwater objects]. E.S. Shakhidzhanov, ed. Moscow, FGUP "TsNIIKhM", 2007, 262 p.
- [4] Zamyshlyayev B.V., Yakovlev Yu.S. *Dinamicheskie nagruzki pri podvodnom vzryve* [Dynamic loads during an underwater explosion]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1967, 387 p.
- [5] Vasyukov V.I., Dildin Yu.M., Ladov S.V. *Opredelenie parametrov gidrodinamicheskikh poloy davleniya i skorostey pri podvodnom vzryve v bezgranichnoy zhidkosti* [Determination of parameters of hydrodynamic fields of pressure and velocities during an underwater explosion in the infinite fluid]. In: *Trudy MVTU No. 312 "Voprosy fiziki vzryva i udara"* [Proceedings of the Moscow Higher Technical School No. 312 "Issues of the explosion and impact physics"]. Moscow, BMHTSh Publ., 1980, pp. 71–83.
- [6] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Parametry techeniya zhidkosti pri proniknovenii v nee kumulyativnoy strui* [Field parameters of liquid flow penetrated by cumulative jet]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennyye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Natural Sciences*, 2002, no. 1 (8), pp. 73–84.

- [7] Ladov S.V., Babkin A.V., Vasyukov V.I., Fedorov S.V. Fizicheskaya kartina i parametry vzryva kumulyativnogo zaryada v bezgranichnoy zhidkosti [[Physical picture and parameters of the shaped charge explosion in the boundless liquid]. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 2002, no. 1–2, pp. 65–71.
- [8] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Orlenko L.P., Fedorov S.V. Osobennosti proniknoveniya kumulyativnoy strui v vodu [Features of the cumulative jet penetration into water]. *Trudy Mezhdunarodnogo seminar “Gidrodinamika vysokikh plotnostey energii”* [Proceedings of the International Seminar “Hydrodynamics of High Energy Densities”]. Novosibirsk, IG SO RAN Publ., 2004, pp. 561–574.
- [9] Ladov S.V. Vozmozhnyi mekhanizm razrusheniya korpusa podvodnoy lodki pri vzryve kumulyativnogo zaryada [Possible mechanism of the submarine hull destruction in the shaped charge explosion]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*, 2015, no. 1 (85), pp. 54–62.
- [10] Babkin A.V., Ladov S.V., Orlenko L.P. Deformirovanie osesimmetrichnoy pregrady pri podvodnom vzryve kumulyativnogo zaryada [Axisymmetric barrier deformation due to underwater explosion of a cumulative charge]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 2 (86). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1853>
- [11] Ladov S.V. Deformirovanie i razrushenie podvodnoy pregrady pri vzryve fugasnykh i kumulyativnykh zaryadov [Underwater barrier deformation and destruction in the high-explosive and shaped charges blast]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 6 (138). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2279>
- [12] Ladov S.V. Povyshenie effektivnosti deystviya malogabaritnykh protivolodochnykh torped [Increasing the effectiveness of small-sized anti-submarine torpedoes]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*, 2016, no. 1 (91), pp. 127–132.
- [13] Ladov S.V. Primenenie kumulyativno-fugasnykh boevykh zaryadnykh otdeleniy v malogabaritnykh protivolodochnykh torpedakh [The use of high-explosive cumulative combat charging compartments in the small-sized anti-submarine torpedoes]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*, 2016, no. 2 (92), pp. 37–42.
- [14] Ladov S.V. Osobennosti deformirovaniya i razrusheniya podvodnoy pregrady pri kumulyativno-fugasnom deystvii vzryva [Features of deformation and destruction of an underwater barrier under the cumulative high-explosive action of an explosion]. In: *XIII Vserossiyskiy syezd po teoreticheskoy i prikladnoy mekhanike: sb. tezisov dokladov* [XIII All-Russian Congress on Theoretical and Applied Mechanics: collection of report abstracts]. In 4 volumes. St. Petersburg, SPBU Publ., 2023, pp. 389–390.
- [15] Korchagin V.N., Vasyukov V.I., Gladkov N.A. et al. *Issledovanie udarnykh protsessov s pomoshchyu pyeoelektricheskikh preobrazovateley* [Study of impact processes using the piezoelectric transducers]. Moscow, BMSTU Publ., 1995, 32 p.
- [16] Babkin A.V., Gelin D.V., Ladov S.V. et al. *Fizika vzryva i udara* [Physics of explosion and impact]. Moscow, BMSTU Publ., 2010, 75 p.
- [17] Ladov S.V. Opyt ispolzovaniya elektretnykh datchikov dlia zamera parametrov podvodnogo vzryva neposredstvenno na pregrade [Experience in using electret sensors to measure the parameters of an underwater explosion directly at the tar-

get]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*, 2021, no. 2 (117), pp. 143–149.

- [18] Andreev S.G., Boyko M.M., Selivanov V.V. *Eksperimentalnye metody fiziki vzryva i udara* [Experimental methods of explosion and impact physics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013, 752 p.

**Ladov S.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, RANS Correspondent Member; Associate Professor, Department of High-Precision Aircraft, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 400 scientific and educational works in the explosion physics. e-mail: ladovsv@bmstu.ru