

Оценка возможности повышения параметров подводного взрыва путем разделения заряда на части

© С.И. Климачков, В.Н. Охитин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Численно исследован одновременный взрыв в воде трех и пяти сферических зарядов одинаковой суммарной массы, размещенных на прямой линии и разнесенных на расстояние 6 и 10 радиусов зарядов. Сравнение параметров взрыва одиночного, а также трех и пяти зарядов одной массы показывает, что в плоскости симметрии размещения зарядов наблюдается повышение максимального давления и удельного импульса водной ударной волны до 80 %. При этом с увеличением расстояния между зарядами выигрыш в давлении уменьшается, а в удельном импульсе — возрастает.

Ключевые слова: взрыв, максимальное давление, сферический заряд, ударная волна, удельный импульс давления, численное моделирование, эпюры давления.

Теоретическому изучению параметров подводного взрыва посвящено большое число работ. Так, в работах [1–5] рассмотрен одномерный взрыв конденсированных и газообразных составов в режимах детонации, дефлаграции и при точечном выделении энергии. Возможности получения направленного фугасного действия подводного взрыва на основе конструктивных схем зарядов отражены в работах [6, 7]. Предложение о повышении эффективности подводного взрыва путем разнесения фугасных зарядов, равных по массе одиночному заряду, высказано в работе [8]. Реализация этого способа связана с выбором параметров конкретной схемы, таких как число единичных зарядов, взаимное их размещение, способ инициирования (одновременно или с задержкой), расстояние между зарядами и т. п.

В настоящей работе численно моделировали взрыв одиночного сферического заряда тротила массой M и радиусом R_0 , а также одновременный взрыв трех ($n = 3$) и пяти ($n = 5$) сферических зарядов массой $m = M/n$ и радиусом $r_0 = R_0/n^{1/3}$, размещенных вдоль оси, при удалении их центров друг от друга на расстояние Δr (см. таблицу).

Варианты расчета

Вариант	n	$M, m, \text{ кг}$	$R_0; r_0, \text{ м}$	$\Delta r, \text{ м}$
1	1	15	0,13	—
2	3	5	0,09	$6r_0 = 0,540$
3	5	3	0,076	$6r_0 = 0,456$
4	3	5	0,09	$10r_0 = 0,900$
5	5	3	0,076	$10r_0 = 0,760$

В численных расчетах использовали метод Лагранжа—Эйлера в двумерной осесимметричной постановке. Для сокращения времени счета учитывали симметрию размещения зарядов и рассматривали лишь четверть области течения. Прямоугольная эйлерова сетка размером $6 \times 3 \text{ м}$ содержала $1,125 \cdot 10^6$ ячеек. Ось абсцисс совпадала с линией размещения зарядов, а ось ординат лежала в плоскости геометрического центра разнесенных зарядов. На осях системы координат ставили условия для жесткой стенки, а на остальных границах расчетной сетки — условия свободного протекания. Вдоль осей системы координат размещали реперные точки, в которых регистрировали параметры взрыва: по оси ординат 16 точек на расстоянии $r = 5R_0$ и более, а по оси абсцисс — 18 точек на расстоянии $r = 10R_0$ и более. Расчеты выполняли с помощью программного комплекса AUTODYN.

Распространение детонации по зарядам взрывчатого вещества (ВВ) рассчитывалось с использованием уравнения состояния JWL для продуктов детонации [9]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V},$$

где $V = \rho_{\text{ВВ}}/\rho_0$ — относительный удельный объем; E — внутренняя энергия на единицу объема; A, B, R_1, R_2, ω — эмпирические константы. Ниже приведены значения эмпирических констант, а также плотности ВВ $\rho_{\text{ВВ}}$, скорости детонации $D_{\text{ВВ}}$ и давления в плоскости Чепмена — Жуге $P_{\text{СЖ}}$ для тротила:

$A, \text{ Гпа}$	2026	ω	0,3
$B, \text{ Гпа}$	3,23	$\rho_{\text{ВВ}}, \text{ кг/м}^3$	1630
R_1	4,15	$D_{\text{ВВ}}, \text{ м/с}$	6930
R_2	0,95	$P_{\text{СЖ}}, \text{ Гпа}$	21,0

Для воды использовали ударную адиабату $D = 1500 + 2u$, где D, u — волновая и массовая скорость в волне соответственно [10].

При взрыве одиночного заряда формируется сферическая ударная волна (УВ). Расчетные значения максимального давления на фронте УВ p_m и удельного импульса положительной фазы давления i отличаются от

экспериментальных значений [11] не более чем на 10 %, что свидетельствует об удовлетворительной точности используемого алгоритма.

На рис. 1 приведены поля давлений в различные моменты времени в случае взрыва трех и пяти зарядов, разнесенных на расстояние $\Delta r = 6r_0$ (см. варианты 2 и 3 в таблице). В направлении линии размещения зарядов (ось абсцисс) формируется цуг распространяющихся одна за другой волн, число которых соответствует числу разнесенных зарядов (три и пять соответственно).

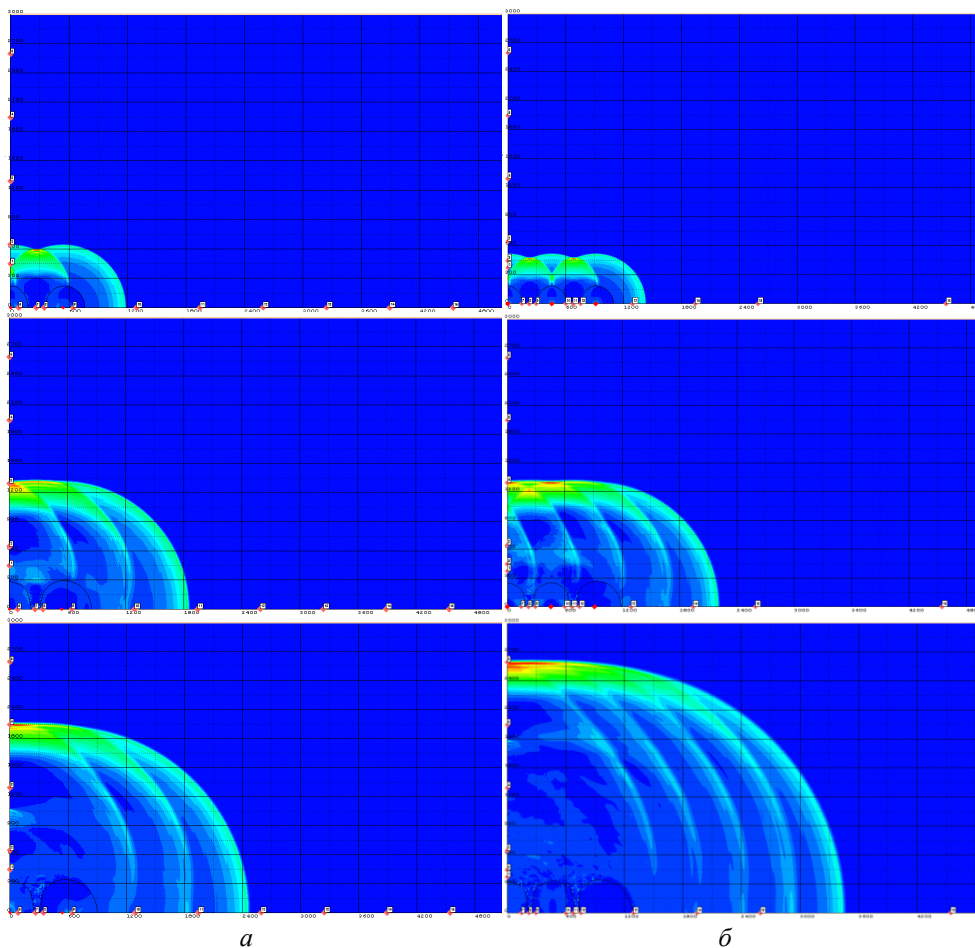


Рис. 1. Поля давлений при взрыве трех (а) и пяти (б) зарядов

На рис. 2 приведены эпюры давления в некоторых реперных точках на оси абсцисс для одиночного и разнесенных на расстояние $\Delta r = 6r_0$ зарядов. Для одиночного заряда эпюры давления имеют классическую экспоненциальную форму, а для разнесенных зарядов — соответствующее число волн, распространяющихся в фазе сжатия первой УВ. Аналогичная картина наблюдается и при разнесении зарядов на расстояние $\Delta r = 10r_0$.

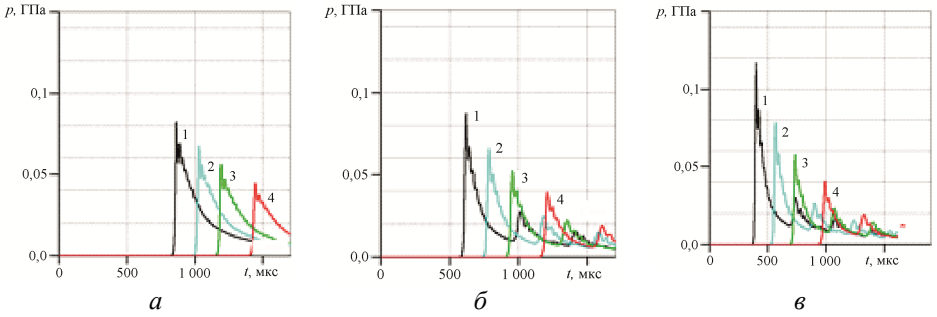


Рис. 2. Эпюры давления в реперных точках на оси абсцисс, удаленных на расстояние $13R_0$ (1), $15R_0$ (2), $17R_0$ (3), $20R_0$ (4), при взрыве одиночного (а), трех (б) и пяти (в) разнесенных зарядов

На рис. 3 представлены зависимости максимального давления в волне p_m от относительного расстояния r/R_0 в логарифмических координатах вдоль оси абсцисс для всех вариантов расчета (см. таблицу). Максимальное значение p_m регистрируется на фронте первой УВ. Последующие волны не догоняют фронт первой — зависимости $p_m(r/R_0)$ имеют гладкую форму и монотонно затухают. При этом до некоторых расстояний значение p_m для разнесенных зарядов остается выше, чем для одиночного заряда. В дальнейшем для одиночного заряда получают большее значение p_m . Это связано с тем, что при разнесении крайний заряд существенно приближается к начальным реперным точкам, однако давление на фронте УВ от него затухает значительно интенсивнее, чем при взрыве одиночного заряда.

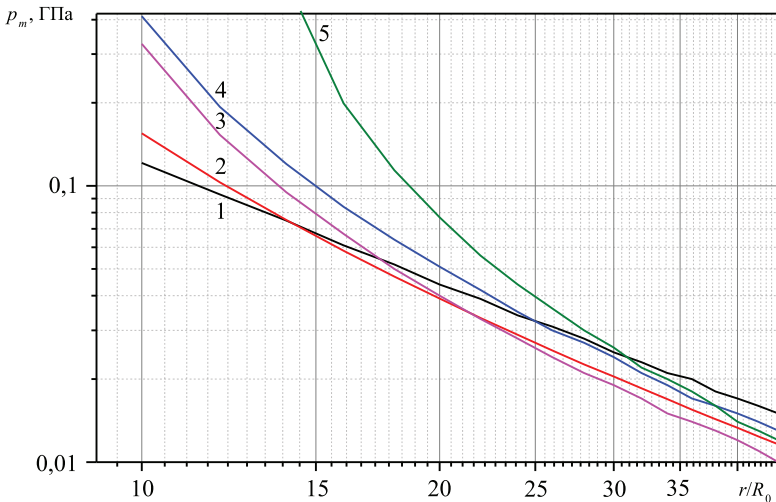


Рис. 3. Зависимости максимального давления в волне от расстояния вдоль оси абсцисс (цифры у кривых соответствуют вариантам расчета в таблице)

На рис. 4 приведены аналогичные зависимости для удельного импульса давления $i(r/R_0)$. Качественно зависимости $i(r/R_0)$ аналогичны зависимостям $p_m(r/R_0)$, что связано с отмеченной выше особенностью разнесенных зарядов, однако заметны количественные различия. Так, на расстоянии $r/R_0 = 40$ для всех вариантов разнесения зарядов наблюдается снижение на 15...30 % максимального давления по сравнению с максимальным давлением для одиночного заряда, в то же время при малом разнесении ($\Delta r = 6r_0$) и одиночном заряде значения импульса давления практически совпадают, а при $\Delta r = 10r_0$ превосходят значения для одиночного заряда на 45...60 %.

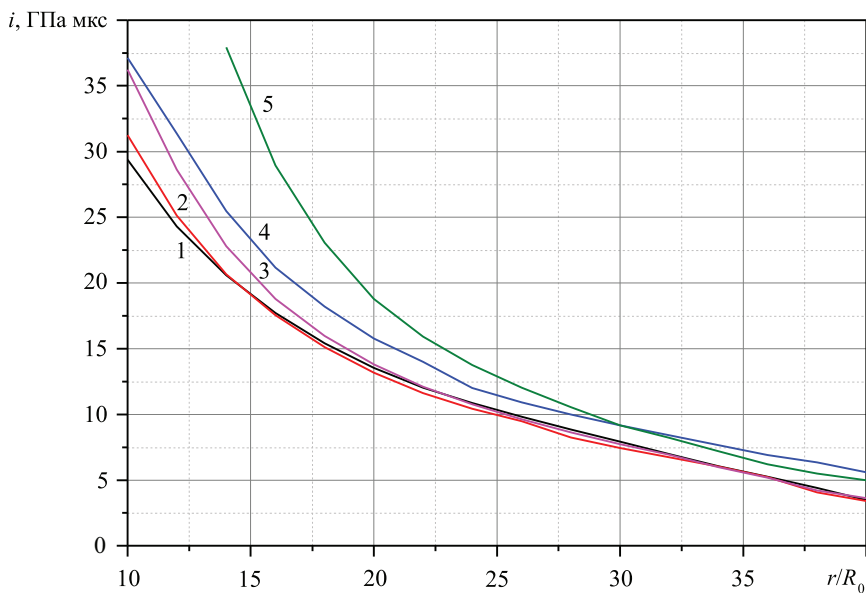


Рис. 4. Зависимости удельного импульса давления в волне от расстояния вдоль оси абсцисс (обозначения — см. рис. 3)

В принципе можно было бы ожидать повышения импульса давления и при малом разнесении зарядов, так как УВ в воде быстро переходит в акустическую стадию и импульсы давления от отдельных зарядов складываются, что, согласно [1], должно привести к возрастанию суммарного импульса в $n^{0,37}$ раз, т. е. на 50 и 80 % при $n = 3$ и 5 соответственно. Очевидно, что отсутствие существенного повышения импульса давления связано с экранированием волн от центральных зарядов продуктами детонации периферийных зарядов.

В направлении оси ординат в случае разнесения зарядов (см. рис. 1) фронты отдельных УВ начинают взаимодействовать и отражаться от плоскости геометрического центра зарядов. В местах взаимодействия волн и отражения от плоскости симметрии образуются области по-

вышенного давления. В итоге фронты отдельных УВ сливаются, образуя единый фронт с максимальным давлением на оси ординат.

На рис. 5 приведены эпюры давления в некоторых реперных точках оси ординат для одиночного и разнесенных на расстояние $\Delta r = 6r_0$ зарядов.

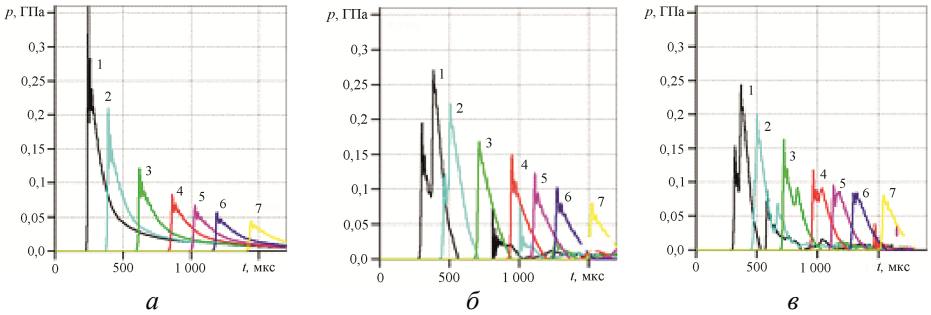


Рис. 5. Эпюры давления в реперных точках на оси ординат, удаленных на расстояние $5R_0$ (1), $7R_0$ (2), $10R_0$ (3), $13R_0$ (4), $15R_0$ (5), $17R_0$ (6), $20R_0$ (7), при взрыве одиночного (а), трех (б) и пяти (в) разнесенных зарядов

Эпюры давления одиночного заряда вдоль оси (см. рис. 3) и в плоскости симметрии на соответствующих расстояниях ($r/R_0 = 13, 15, 17, 20$) практически совпадают, что свидетельствует о сохранении сферической симметрии при использовании двумерного алгоритма расчета. Эпюры для $n = 3$ и 5 (см. рис. 5) содержат соответствующее число пиков давления. На близких расстояниях пики давления удаленных от плоскости симметрии зарядов могут находиться в фазе отрицательного давления волны близлежащих зарядов. Это хорошо видно на рисунке, где при расстоянии $r/R_0 = 5$ пик давления отраженной от плоскости симметрии волны от третьего заряда лежит в области отрицательных давлений в волне от первых двух зарядов.

На рис. 6 представлены зависимости $p_m(r/R_0)$ в плоскости симметрии размещения зарядов (ось ординат). При разнесении как трех, так и пяти зарядов на расстояние $\Delta r = 6r_0$ появляется локальный максимум p_m на расстоянии $r/R_0 = 11$ и 9 соответственно, что связано со слиянием фронтов УВ в направлении оси ординат. После расстояний $r/R_0 = 6,3$ ($n = 3$) и 8 ($n = 5$) для разнесенных зарядов значения p_m больше и достигают примерно 80 и 45 % соответственно по сравнению с аналогичным значением при взрыве одиночного заряда. При $n = 5$ в результате подхода волны от самого удаленного заряда спад давления на фронте замедляется, и на расстоянии $r = 20R_0$ это давление становится равным давлению в волне от трех зарядов, которое на 80 % выше давления в волне от одиночного заряда.

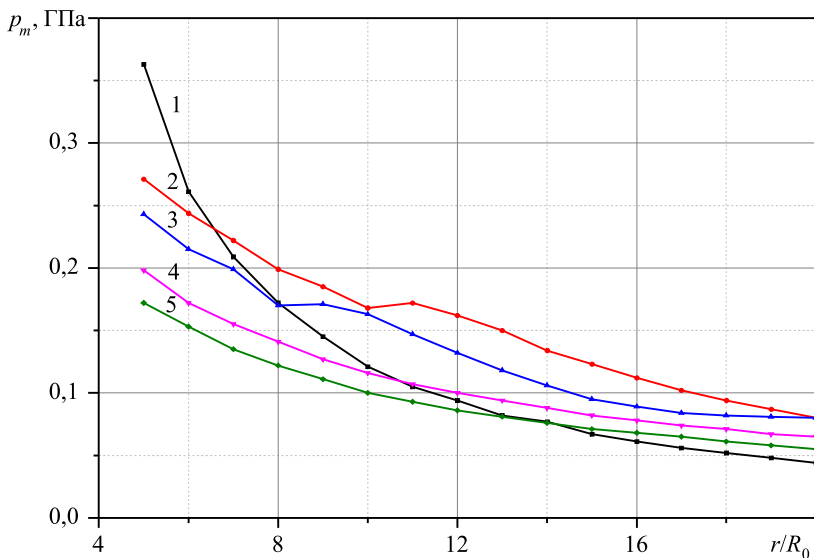


Рис. 6. Зависимости максимального давления от расстояния вдоль оси ординат (обозначения — см. рис. 3)

При расстоянии между зарядами $\Delta r = 10r_0$ зависимости $p_m(r/R_0)$ гладкие (без локальных максимумов), т. е. слияния фронтов при отражении от плоскости симметрии в рассматриваемом диапазоне расстояний еще не произошло, однако после расстояний $r/R_0 = 6,7$ ($n = 3$) и $14,3$ ($n = 5$) значения p_m становятся больше, чем при взрыве одиночного заряда (примерно на 50 и 25 % соответственно в точке $r = 20R_0$).

На рис. 7 представлены зависимости импульса положительной фазы давления от расстояния в плоскости симметрии размещения зарядов вдоль оси ординат. Для $n = 5$ как при малом ($\Delta r = 6r_0$), так и при большом ($\Delta r = 10r_0$) разнесении наблюдается скачкообразное изменение импульса давления на расстояниях соответственно $(6...7)R_0$ и $(9...10)R_0$. Это связано с выходом волны от самых удаленных зарядов в зону положительного давления в волне от центральных зарядов. После такого скачкообразного изменения импульсы давления от пяти зарядов начинают практически совпадать с импульсами от трех зарядов при соответствующих разнесениях.

Импульс положительной фазы давления при разнесении зарядов на расстояние $\Delta r = 10r_0$ становится больше импульса давления от одиночного заряда на удалении порядка $13r_0$, а при $\Delta r = 6r_0$ — $17r_0$. При этом на расстоянии $20R_0$ импульсы давления от разнесенных зарядов превышают импульс от одиночного заряда примерно на 80 и 40 % соответственно.

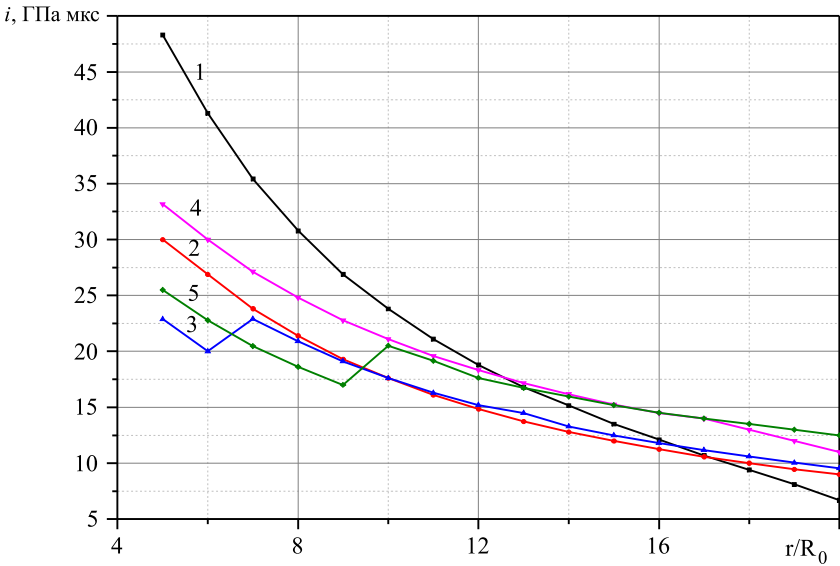


Рис. 7. Зависимости импульса положительной фазы давления от расстояния вдоль оси ординат (обозначения — см. рис. 3)

Таким образом, проведенные оценки позволяют сделать вывод, что разделение заряда на части и размещение этих частей вдоль оси при одновременном инициировании приводит к повышению до 80 % максимального давления водной УВ в плоскости симметрии размещения зарядов на некоторых расстояниях. Увеличение разнесения зарядов вдоль оси приводит к снижению выигрыша в максимальном давлении. Импульс положительной фазы давления при разнесении зарядов начиная с некоторого расстояния становится больше импульса давления от единичного заряда, при этом с увеличением разнесения зарядов это превышение возрастает и может достигать 80 %.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Баум Ф.А., Станюкович К.П., ред. *Физика взрыва*. 2-е изд. Москва, Наука, 1975, 704 с.
- [2] Кошевец С.В., Охитин В.Н. Математическое моделирование сферического газового взрыва в воде. *Оборонная техника*, 1993, № 9.
- [3] Охитин В.Н., Климачков С.И., Первалов И.А. Математическое моделирование сферической газовой дефлаграции в воде. *Оборонная техника*, 2003, № 3–4, с. 36–41.
- [4] Охитин В.Н., Климачков С.И., Первалов И.А. Подводный взрыв конденсированных составов в режиме дефлаграции. *Оборонная техника*, 2002, № 1–2, с. 61–65.
- [5] Сидняев Н.И. Теоретические исследования гидродинамики при подводном взрыве точечного источника. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013, вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/614.html>

- [6] Колпаков В.И., Орленко Л.П., Рубцов А.А. Математическое моделирование направленного подводного взрыва осесимметричного заряда ВВ. *Оборонная техника*, 1995, № 4.
- [7] Колпаков В.И., Ладов С.В. Численный анализ конструктивных схем зарядов, обеспечивающих направленное фугасное действие подводного взрыва. *Оборонная техника*, 2003, № 3–4, с. 49–55.
- [8] Озерецковский О.И. *Действие взрыва на подводные объекты*. Москва, ЦНИИХМ, 2007, 262 с.
- [9] Орленко Л.П. *Физика взрыва и удара*. Москва, Физматлит, 2006, 304 с.
- [10] Андреев С.Г., Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2 т. 3-е изд. Москва, Физматлит, 2004, 1488 с.
- [11] Коул Р. *Подводные взрывы*. Москва, Иностранная литература, 1950, 494 с.

Статья поступила в редакцию 05.06.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Климачков С.И., Охитин В.Н. Оценка возможности повышения параметров подводного взрыва путем разделения заряда на части. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 04. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1395.html>

Климачков Сергей Ильич родился в 1955 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1982 г. Научный сотрудник НИИ специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 30 научных работ в области физики горения и взрыва. e-mail: klimu1912@hotmail.com

Охитин Владимир Николаевич родился в 1943 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1966 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 350 научных работ в области физики горения и взрыва. e-mail: okhitin@sm.bmstu.ru

Assessing the possibility of increasing the parameters of an underwater explosion by splitting the charge into separate parts

© S.I. Klimachkov, V.N. Okhitin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

We numerically investigated the simultaneous explosion in the water of three and five spherical charges located in line with a spacing of 6 and 10 radii of the same charges. Comparison of the parameters of the explosion of a single and three and five charges of the same mass showed that in the plane of symmetry of the charges location there is an increase of the maximum pressure and the specific impulse of the aqueous shock wave up to 80 %. As the distance between the charges is increasing, the gain on pressure decreases, and it increases on the specific impulse.

Keywords: explosion, the maximum pressure, spherical charge, the shock wave, the specific impulse of pressure, numerical simulation, pressure diagrams.

REFERENCES

- [1] Baum F.A., Stanyukovich K.P., eds. *Fizika vzryva* [The Physics of explosion]. 2nd edition, revised. Moscow, Nauka Publ., 1975, 704 p.
- [2] Koshevets S.V., Okhitin V.N. *Oboronnaya tekhnika — Defense equipment*, 1993, no. 9.
- [3] Okhitin V.N., Klimachkov S.I., Perevalov I.A. *Oboronnaya tekhnika — Defense equipment*, 2003, no. 3–4, pp. 36–41.
- [4] Okhitin V.N., Klimachkov S.I., Perevalov I.A. *Oboronnaya tekhnika — Defense equipment*, 2002, no. 1–2, pp. 61–65.
- [5] Sidnyaev N.I. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, issue 2. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/614.html>
- [6] Kolpakov V.I., Orlenko L.P., Rubtsov A.A. *Oboronnaya tekhnika — Defense equipment*, 1995, no. 4.
- [7] Kolpakov V.I., Ladov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defense equipment*, 2003, no. 3–4, pp. 49–55.
- [8] Ozeretskovsky O.I. *Deistvie vzryva na podvodnye ob"ekty* [Effect of explosion on the underwater objects]. E.S. Shakhidzhanova, ed. Moscow, Federal State Unitary Enterprise "TsNIIKhM", 2007, 262 p.
- [9] Orlenko L.P. *The physics of the explosion and shock*. Moscow, Fizmatlit, 2006, 304 p.
- [10] Andreev S.G., Orlenko L.P., eds. *Fizika vzryva* [The Physics of explosion]. 3rd edition, revised. In 2 vols. Moscow, Fizmatlit, 2004, 1488p.
- [11] Cole R. *Underwater explosion*. Moscow, Foreign Literature, 1950, 494 p. (In Russian).

Klimachkov S.I. (b. 1955) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1982. Researcher at the Special Machinery Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. The author of 30 scientific works in the field of physics of combustion and explosion. e-mail: klimu1912@hotmail.com

Okhitin V.N. (b. 1943) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. Dr. Sci. (Engineering), professor of the Department of High-Precision Airborne Devices at the Bauman Moscow State Technical University. The author of 350 scientific works in the field of physics of combustion and explosion.
e-mail: okhitin@sm.bmstu.ru