

## Параметры подводного взрыва разнесенных зарядов с задержкой

© С.И. Климачков, В.Н. Охитин

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

*Численно исследован взрыв в воде трех и пяти сферических зарядов одинаковой суммарной массы, размещенных на прямой линии на расстоянии 10 радиусов зарядов, с учетом времени задержки их срабатывания. Время задержки каждого заряда выбиралось из условия одновременного прихода в определенную точку пространства водных ударных волн от зарядов. Проведено сравнение динамики и параметров взрыва при одновременном подрыве и подрыве с различным временем задержки этих зарядов. Показано, что, подобрав время задержки при взрыве разнесенных зарядов, можно получить существенное повышение давления водной ударной волны в определенном интервале пространства в плоскости симметрии размещения зарядов. При этом увеличение времени задержки смещает точку максимального давления к центру симметрии зарядов.*

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

На практике при проведении специальных подводных работ, таких как разрушение льда, сейсморазведка, строительство подводных переходов магистральных трубопроводов, часто применяют разнесенные заряды взрывчатого вещества (ВВ). Для оценки и реализации их действия учитывают влияние таких факторов, как геометрическая форма зарядов [1], рецептура снаряжения [2, 3], масса и способ инициирования зарядов [4], особенности конструктивной компоновки [5]. При этом почти всегда представляет практический интерес повышение параметров подводного взрыва при срабатывании разнесенных зарядов.

Численной оценке повышения параметров подводного взрыва путем разнесения фугасных зарядов посвящена работа [6]. Сравнение параметров взрыва одного, трех и пяти сферических зарядов тротила, имеющих одинаковую суммарную массу и расположенных на одной оси, показало, что в плоскости симметрии размещения разнесенных зарядов максимальное давление и удельный импульс давления водной ударной волны приблизительно на 80 % превышают параметры взрыва одиночного заряда. При этом с увеличением расстояния между зарядами выигрыш в давлении уменьшается, а в удельном импульсе возрастает. Отметим, что взрывы трех и пяти зарядов были одновременными. В данной работе дается численная оценка параметров подводного взрыва при срабатывании разнесенных зарядов с некоторым временем задержки.

Моделируются взрывы в безграничной жидкости трех и пяти сферических зарядов тротила, лежащих на одной прямой, с учетом

времени задержки при срабатывании. Массовые и геометрические параметры единичного заряда выбраны следующими:  $m = 5$  кг и  $r_0 = 0,09$  м для трех зарядов;  $m = 3$  кг и  $r_0 = 0,076$  м — для пяти. Расстояние между зарядами составляло 10 их начальных радиусов. Заряды детонируют в такой последовательности и с таким временем задержки, чтобы в выбранной точке пространства или области около нее, лежащей на плоскости симметрии размещения зарядов, наблюдалось увеличение параметров взрыва.

В качестве примера на рис. 1 представлена схема размещения трех зарядов для определения времени задержки. Здесь  $R_1, R_2$  — расстояния от зарядов до выбираемой точки пространства, в которую ударные волны должны прийти одновременно;  $t_1, t_2$  — время распространения ударной волны от заряда до рассматриваемой точки, которое определяется по формуле  $t_i = r_0/D + R_i/c$  ( $D$  — скорость детонации,  $c$  — скорость звука в воде). Порядок подрыва зарядов таков: в момент времени  $t = 0$  детонируют крайние заряды, через время задержки  $\Delta t = t_2 - t_1 = (R_2 - R_1)/c$  — центральный заряд. В схеме из пяти зарядов первыми подрываются крайние заряды, через время задержки  $\Delta t_1$  — средние и через время  $\Delta t_2$  — центральный заряд.

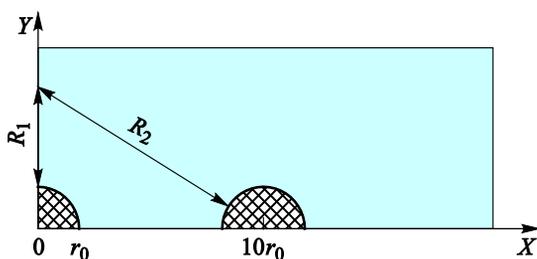


Рис. 1. Схема определения времени задержки

При численном моделировании взрыва разнесенных зарядов с учетом времени задержки использовали те же, что и в работе [6], уравнения состояния (JWL — для продуктов детонации [7], ударная адиабата — для воды [8]) и граничные условия. В основе численного алгоритма лежит лангранжево-эйлеров метод в двумерной осесимметричной постановке, при этом рассматривают четверть области течения с прямоугольной эйлеровой сеткой размером  $3,2 \times 3,2$  м, содержащей  $800 \times 800$  ячеек, и применяют программный комплекс AUTODYN. Реперные точки располагали в плоскости симметрии размещения зарядов ВВ, начиная с расстояния  $r = 0,65$  м от оси симметрии зарядов с шагом  $0,13$  м. Координаты реперных точек выбирали таким образом, чтобы можно было сравнить параметры взрыва при одновременном подрыве зарядов, полученные в работе [6], и параметры взрыва с учетом времени задержки. Используемый алгоритм

был опробован в работе [6], в которой результаты численного расчета одиночного заряда сравнивались с известными экспериментальными данными [9]. Исходные данные восьми вариантов расчета приведены в таблице.

**Исходные данные для расчетов**

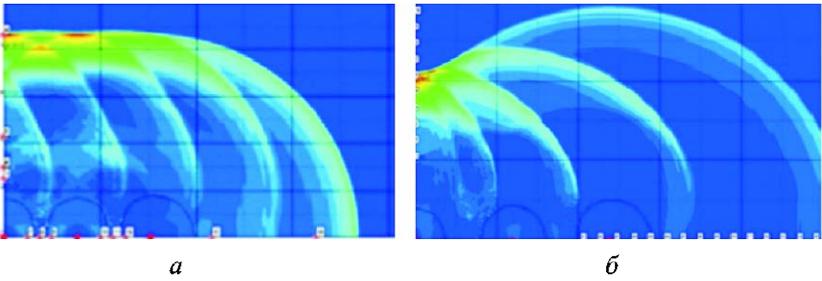
Номер варианта	Координата точки на оси $OY$ , мм	Время задержки, мкс	
		$\Delta t_1$	$\Delta t_2$
<i>Подрыв трех зарядов</i>			
1	650	307	—
2	1300	187	—
3	1950	132	—
4	2600	100	—
<i>Подрыв пяти зарядов</i>			
5	650	435	669
6	1300	330	467
7	1950	253	348
8	2600	202	274

Из таблицы видно, что чем ближе к началу координат находится выбранная на оси  $OY$  точка, тем больше время задержки между подрывами зарядов.

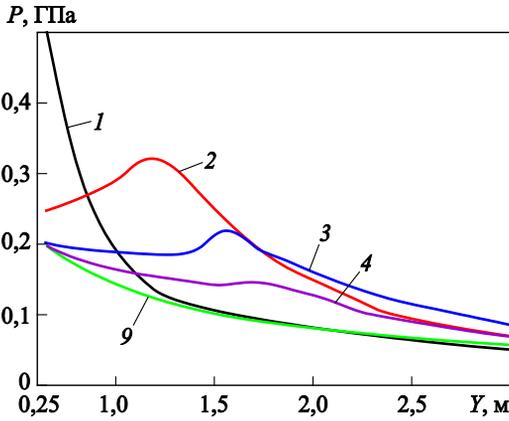
Введение задержки инициирования зарядов изменяет динамику взрыва по сравнению с динамикой при одновременном подрыве. На типичных полях давлений при одновременном подрыве и подрыве с задержкой пяти зарядов (рис. 2) видно, что:

- в направлении оси  $OX$  в первом случае волны распространяются с увеличением интервалов одна относительно другой, а во втором — почти на одинаковом расстоянии;
- в направлении оси  $OY$  единый фронт ударной волны, образовавшийся в результате слияния ударных волн от отдельных зарядов, в первом случае перпендикулярен оси ординат, а во втором — направлен к ней под углом, при этом создается более высокое давление при движении вдоль оси  $OY$ .

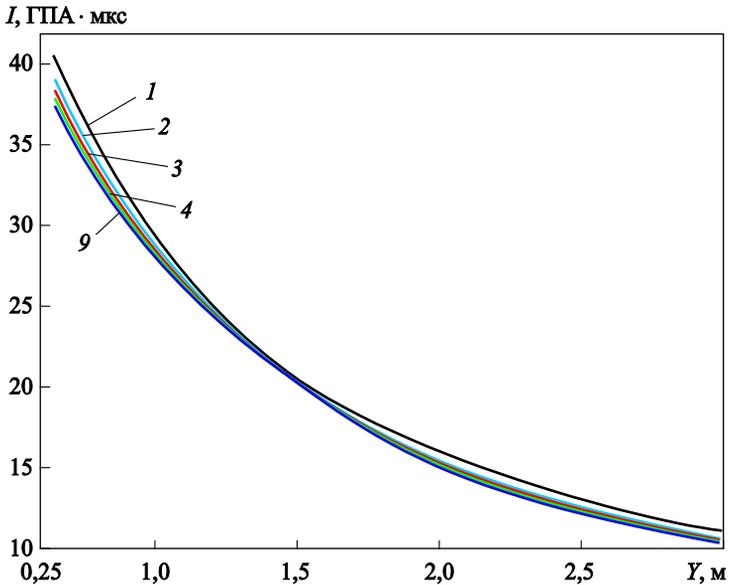
На рис. 3 и 4 представлены зависимости максимального давления в волне и удельного импульса давления от расстояния вдоль оси ординат при подрыве трех зарядов с задержкой и при одновременном подрыве. Номера кривых 1–4 соответствуют номерам вариантов расчета (см. таблицу); кривая 9 представляет собой зависимость, полученную в работе [6] для одновременного подрыва.



**Рис. 2.** Поля давлений при взрыве пяти зарядов:  
*а* — одновременный подрыв; *б* — подрыв с задержкой



**Рис. 3.** Зависимости максимального давления от расстояния вдоль оси ординат при подрыве трех зарядов



**Рис. 4.** Зависимости импульсов давления от расстояния вдоль оси ординат при подрыве трех зарядов

Введение задержки между подрывами зарядов приводит не только к появлению локального максимума в некоторой точке зависимости давления (см. рис. 3), но и к повышению давления во всей расчетной области по сравнению с давлением при одновременном подрыве. Так, численные значения давлений в локальных максимумах превышают значения давления в тех же точках при одновременном подрыве в 2,3...2,6 раза. С уменьшением времени задержки зона повышенного давления растягивается и удаляется от начала координат, а максимальное давление в ней падает с 0,499 ГПа при времени задержки  $\Delta t_1 = 307$  мкс до 0,147 ГПа при  $\Delta t_1 = 100$  мкс.

Зависимости импульсов избыточного давления (см. рис. 4) при подрыве с задержкой не имеют локальных максимумов. На всем интервале 0,65...3,0 м значения импульсов давления при подрыве с задержкой превышают значения импульсов при одновременном подрыве, полученные в одних и тех же точках на оси  $OY$ , в 1,05...1,10 раза. При уменьшении времени задержки с 307 до 100 мкс импульсы давления уменьшаются один относительно другого максимум на 5 %. Таким образом, значительного увеличения импульса давления при подрыве трех зарядов с задержкой не наблюдается.

На рис. 5 и 6 представлены зависимости максимального давления в волне и удельного импульса давления от расстояния в плоскости размещения зарядов (ось  $OY$ ) для вариантов расчета при подрыве пяти зарядов с задержкой (кривые 5–8) и при одновременном подрыве (кривая 10).

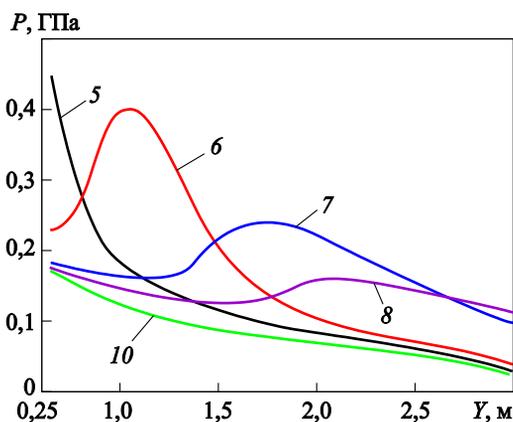


Рис. 5. Зависимости максимального давления от расстояния вдоль оси ординат при подрыве пяти зарядов

Зависимости максимального давления при подрыве пяти зарядов с задержкой качественно аналогичны зависимостям при подрыве трех зарядов с задержкой, при этом значения максимальных давле-

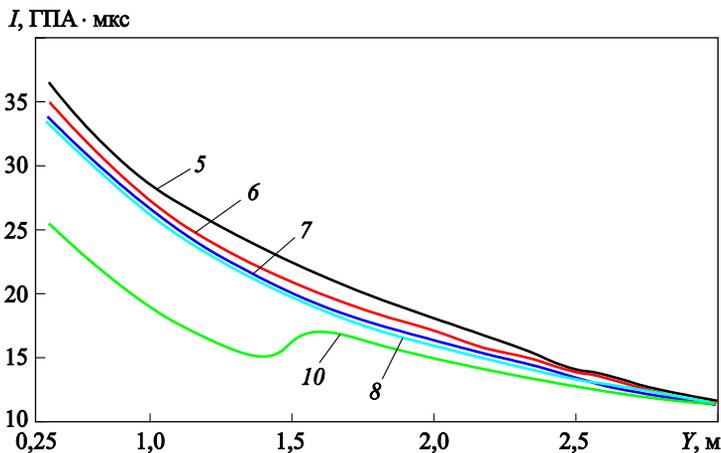


Рис. 6. Зависимости импульсов давления от расстояния вдоль оси ординат при подрыве пяти зарядов

ний в локальных максимумах у них в 1,2...1,1 раза выше, чем значения аналогичных показателей при подрыве трех зарядов. Давления при подрыве зарядов с задержкой превышают давление при одновременном подрыве в 2,4...3,4 раза.

В свою очередь уменьшение времени задержки приводит к снижению давления в локальных максимумах. Анализ графиков на рис. 3 и 5 показывает, что координаты локальных максимумов при взрыве как трех, так и пяти зарядов с задержкой заметно меньше координат точек ожидаемых максимумов, по которым рассчитывали время задержек (см. таблицу). Связано это с проявлением нелинейных эффектов, возникающих при отражении суммарного фронта волны под изменяющимся углом от плоскости симметрии размещения зарядов в случае взрыва с задержкой.

Зависимости избыточных импульсов при подрыве пяти зарядов с задержкой (рис. 6) имеют гладкую форму, без скачкообразного изменения в отличие аналогичных зависимостей при одновременном подрыве зарядов [6].

Как и при подрыве трех зарядов, импульсы давления при подрыве с задержкой больше импульса давления при одновременном подрыве вдоль всей оси  $OY$ . Однако это превышение значительное (в 1,42...1,15 раза). При уменьшении времени задержки на всем расстоянии импульс в случае подрыва с задержкой убывает; численные значения его различаются максимум на 10 %.

Сравнительный анализ полученных данных при взрыве пяти и трех зарядов с задержкой показывает, что увеличение количества зарядов в рассматриваемом случае приводит к повышению параметров взрыва.

Таким образом, проведенное численное исследование позволяет сделать следующий вывод: изменяя время задержки, можно получить

область повышенного давления в определенном интервале пространства в плоскости симметрии размещения зарядов. С увеличением времени задержки эта область повышенного давления приближается к центру симметрии зарядов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Колпаков В.И., Орленко Л.П., Рубцов А.А. Математическое моделирование направленного подводного взрыва осесимметричного заряда ВВ. *Оборонная техника*, 1995, № 4, с. 25–28.
- [2] Охитин В.Н., Климачков С.И., Перевалов И.А. Математическое моделирование сферической газовой дефлаграции в воде. *Оборонная техника*, 2003, № 3–4, с. 36–41.
- [3] Охитин В.Н., Климачков С.И., Перевалов И.А. Подводный взрыв конденсированных составов в режиме дефлаграции. *Оборонная техника*, 2002, № 1–2, с. 61–65.
- [4] 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.
- [5] Озерцовский О.И. *Действие взрыва на подводные объекты*. Шахиджанов Е.С., ред. Москва, ФГУП «ЦНИИХМ», 2007, 262 с.
- [6] Охитин В.Н., Климачков С.И. Оценка возможности повышения параметров подводного взрыва путем разделения заряда на части. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mdsb/1395.html>
- [7] Орленко Л.П. *Физика взрыва и удара*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2006, 304 с.
- [8] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. 3-е изд. В 2 т. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2004, 1488 с.
- [9] Коул Р. *Подводные взрывы*. Москва, Иностранная литература, 1950, 494 с.

Статья поступила в редакцию 02.06.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Климачков С.И., Охитин В.Н. Параметры подводного взрыва разнесенных зарядов с задержкой. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-08-1526>

**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

## Parameters of separated charges underwater delayed explosion

© S.I. Klimachkov, V.N. Okhitin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article considers numerical investigation of the explosion in the water of three and five spherical charges having the same total weight, arranged in a straight line at a distance of 10 charge radii taking into account the time delay of triggering. The delay times are selected from the condition of the simultaneous arrival of water shock waves from the charges into a certain point in space. The dynamics and parameters of the explosions with simultaneous blasting and blasting of these charges with different delay times are compared. It is shown that by choosing the delay time when exploding spaced charges a substantial increasing of water shock wave pressure can be obtained in a certain range of the space in a plane of symmetry of charge placement. At the same time the increase in the delay time shifts the maximum pressure point to the center of the charge symmetry.*

**Keywords:** explosion, maximum pressure, spherical charge, shock wave, the specific pressure pulse, numerical simulation.

### REFERENCES

- [1] Kolpakov V.I., Orlenko L.P., Rubtsov A.A. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 1995, no. 4, pp. 25–28.
- [2] Okhitin V.N., Klimachkov S.I., Perevalov I.A. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 2003, no. 3-4, pp. 36–41.
- [3] Okhitin V.N., Klimachkov S.I., Perevalov I.A. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 2002, no. 1–2, pp. 61–65.
- [4] Kolpakov V.I., Ladov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 2003, no. 3–4, pp. 49–55.
- [5] Ozeretskovskiy O.I. *Deystvie vzryva na podvodnye obyekty* [Blast action on underwater objects]. Shakhidzhanov E.S., ed. Moscow, Federal State Unitary Enterprise "TsNIIKhM" Publ., 2007, 262 p.
- [6] Okhitin V.N. Klimachkov S.I. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, issue. 4. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mdsb/1395.html>
- [7] Orlenko L.P. *Fizika vzryva i udara* [The physics of the explosion and shock]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006, 304 p.
- [8] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [The physics of explosion]. 3<sup>rd</sup> revised edition in 2 volumes, Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004, 1488 p.
- [9] Cole R.H. *Underwater explosion*. Princeton, Princeton Univ. Press, 1948 [In Russ.: Cole R. Underwater explosion. Moscow, Inostrannaya Literatura Publ., 1950, 494 p.].

**Klimachkov S.I.** (b. 1955) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1982. Researcher, Special Machinery Research Institute, Bauman Moscow State Technical University. Author of 30 research 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. (Eng.), Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of 350 research works in the field of physics of combustion and explosion. e-mail: okhitin@sm.bmstu.ru