

## ВЛИЯНИЕ ТОЧКИ ИНИЦИИРОВАНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ВЗРЫВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА НА ЖЕСТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.Н. Охитин, С.С. Меньшаков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
e-mail: Okhitin@sm.bmstu.ru; mss-2012@mail.ru

*Проведено численное моделирование взрыва цилиндрического заряда из тротила с отношением высоты к диаметру порядка 10, расположенного вертикально на жесткой поверхности, моделирующей землю. Рассмотрено несколько способов инициирования заряда — отдельно на торцах, в центре или же с обоих торцов одновременно. Оценено влияние места инициирования на параметры фугасного действия заряда на близких расстояниях.*

**Ключевые слова:** взрыв, детонация, заряд, избыточное давление, инициирование, удельный импульс, фугасное действие.

## INFLUENCE OF A POINT OF CHARGE INITIATION ON PARAMETERS OF CYLINDRICAL CHARGE EXPLOSION ON RIGID SURFACE

V.N. Okhitin, S.S. Menshakov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
e-mail: Okhitin@sm.bmstu.ru; mss-2012@mail.ru

*The numerical simulation of explosion is performed for the cylindrical TNT charge with a height-to-diameter ratio on the order of 10 located vertically on the rigid surface modeling the ground. Several methods for the charge initiation are considered: at separate ends, at the center, and at both ends simultaneously. The influence of the initiation point on the parameters of explosive action of the charge at small distances is estimated.*

**Keywords:** explosion, detonation, charge, excess pressure, initiation, specific impulse, explosive action.

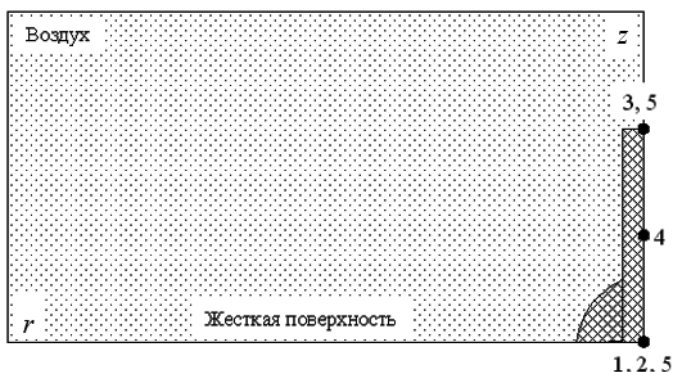
Воздушный взрыв цилиндрических зарядов ВВ исследовался во многих работах как экспериментально [1–3], так и теоретически [4, 5].

Достаточно полную информацию по параметрам наземного взрыва цилиндрических зарядов конечной длины можно найти в работах [6, 7].

Что касается влияния положения точки инициирования на оси симметрии цилиндрического заряда на параметры наземного взрыва, то каких-либо данных по этому вопросу в открытой литературе авторам найти не удалось.

Настоящая работа является попыткой восполнить этот пробел.

Для этого с помощью метода конечных элементов проводилось численное моделирование взрыва цилиндрического заряда из тротила (ТНТ) массой  $m_0 = 100$  кг, плотностью  $\rho = 1630$  кг/м<sup>3</sup>, диаметром  $d_0 = 2r_0 = 200$  мм и высотой  $h_0 = 1952,8$  мм, расположенного вертикально на жесткой поверхности, моделирующей землю. Таким образом, относительное удлинение заряда составило  $h_0/d_0 = 9,76 \approx 10$ .



**Рис. 1. Схема расположения зарядов ВВ на расчетной сетке**

Инициирование заряда осуществлялось попеременно в различных точках на оси симметрии — на торцах заряда, в центре или же с обоих торцов одновременно. Для сравнительной оценки проводился отдельный расчет взрыва эквивалентного по массе полусферического заряда ТНТ радиусом 308 мм, иницируемого в центре на жесткой поверхности.

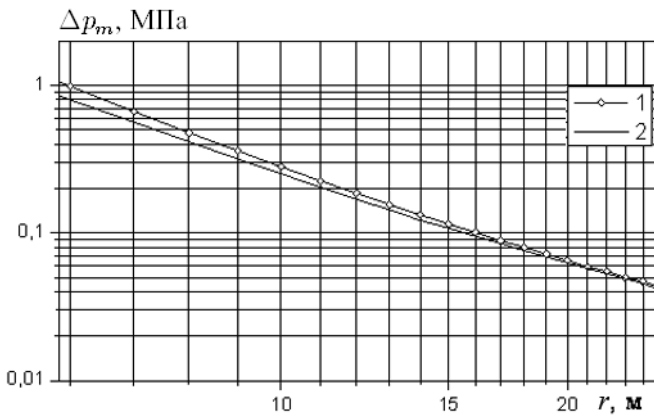
Схема расположения зарядов ВВ на расчетной сетке с указанием точек инициирования и номеров вариантов приведена на рис. 1, а описания вариантов расчета — в таблице.

#### Варианты расчета

№ варианта	$r_0$ , мм	Описание варианта и положение точки инициирования
1	308	Полусфера, центр
2	100	Цилиндр, нижний торец
3	100	Цилиндр, верхний торец
4	100	Цилиндр, центр
5	100	Цилиндр, одновременно на обоих торцах

Расчеты проводились на эйлеровой сетке  $600 \times 2500$  с размером ячейки  $10 \times 10$  мм и продолжались до момента времени, когда на больших удалениях от места взрыва на эпюрах избыточного давления полностью выделится воздушная ударная волна (УВ) с фазой сжатия. Этому условию соответствует последняя точка на расстоянии 16 м от центра взрыва, что составило 160 и  $\sim 52$  безразмерных радиусов для цилиндрического и полусферического зарядов.

Верификация результатов расчетов проводилась экспериментально на основе варианта 1, по отношению к которому определялась точность расчетов (при сравнении с известными зависимостями Садовского [8]) по максимальному избыточному давлению, импульсу и



**Рис. 2.** Зависимости изменения максимального избыточного давления от расстояния до центра взрыва

длительности положительной фазы сжатия, рассчитываемых в точках на жесткой поверхности с шагом 0,5 м на удалении 1... 5 м и шагом 1 м на удалении 5... 25 м.

Результаты расчетов для варианта 1 приведены на рис. 2, где представлены максимальные избыточные давления  $\Delta p_m$ , рассчитанные на удалении от центра взрыва  $r$  (кривая 2) и определенные по формуле Садовского (кривая 1 для заряда удвоенной массы) [8]:

$$\Delta p_m = 0,084 \frac{\sqrt[3]{2m_0}}{r} + 0,27 \left( \frac{\sqrt[3]{2m_0}}{r} \right)^2 + 0,7 \left( \frac{\sqrt[3]{2m_0}}{r} \right)^3. \quad (1)$$

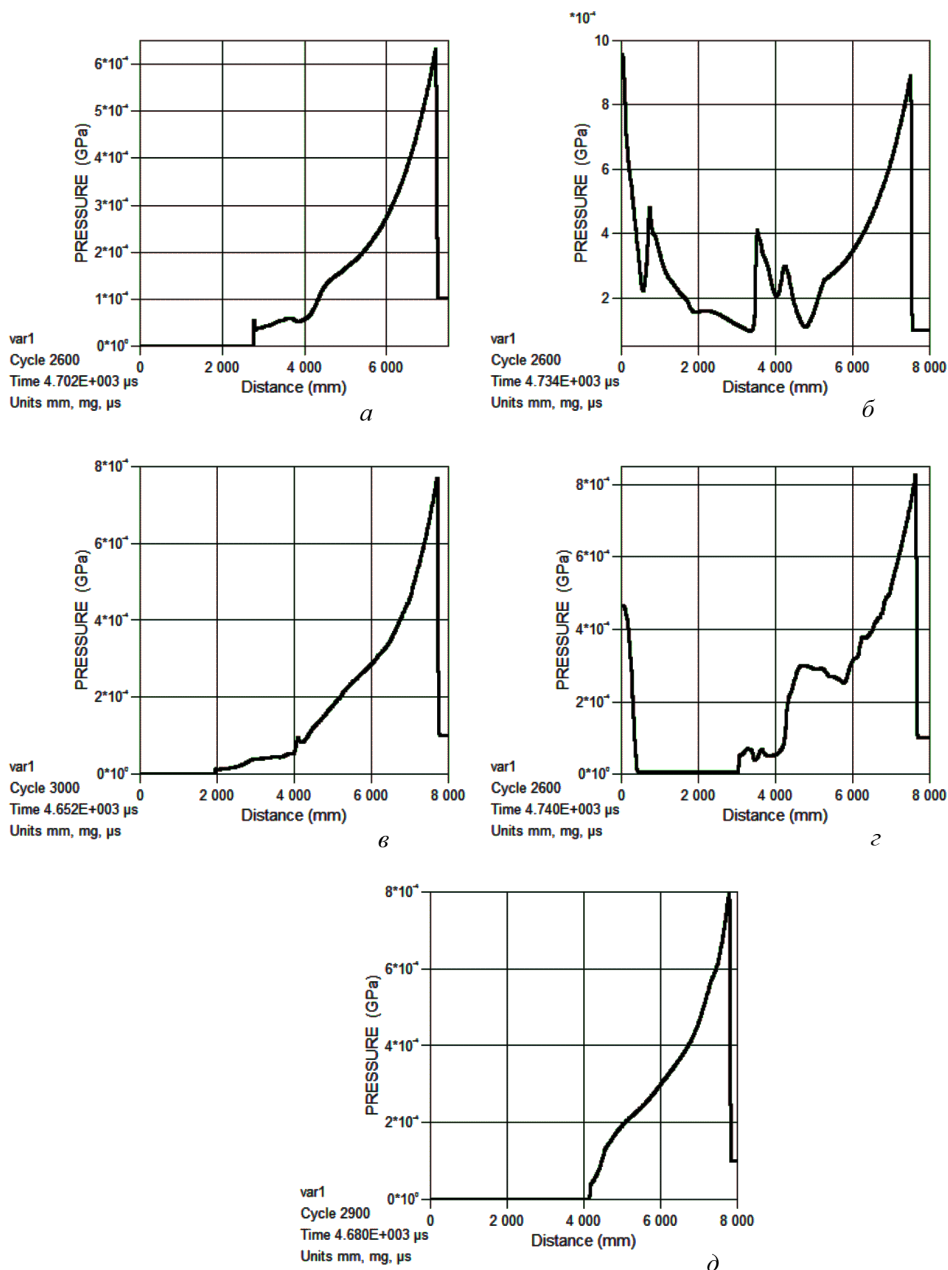
Сравнение их показывает, что имеет место систематическое занижение результатов численного расчета по сравнению с экспериментом. На ближней границе применимости формулы (1)  $r = \sqrt[3]{2m_0} \sim 5,85$  м расхождение между результатами составило  $\sim 25\%$ , а на расстоянии 20 м от центра взрыва уменьшилось до 3,1%, что говорит об удовлетворительном соответствии расчета и эксперимента.

Аналогичные результаты наблюдаются при сравнении длительностей и импульсов положительной фазы сжатия [8], где максимальное отличие в результатах не превышает 25%.

Таким образом, верификация показала, что результаты численного моделирования взрыва полусферического заряда на жесткой поверхности удовлетворительно совпадают с результатами экспериментов.

На рис. 3 приведены распределения давления по координате вдоль жесткой поверхности, рассчитанные в близкие моменты времени во всех вариантах расчета, когда фронт УВ в воздухе удалился примерно на 8 м от места взрыва.

При взрыве полусферического заряда (рис. 3, а) распределение давления за фронтом воздушной УВ аналогично распределению, полученному при решении одномерной сферической задачи в момент вре-



**Рис. 3. Распределения полного давления по координате вдоль жесткой поверхности**

мени, когда фронт УВ находится на расстоянии примерно 23 радиусов заряда [8]. Отчетливо регистрируется вторичная УВ, распространяющаяся к центру взрыва.

При инициировании цилиндрического заряда в центре нижнего торца (рис. 3, б) волновая картина невероятно усложняется. В области течения за фронтом основной УВ можно выделить уже несколько вто-

ричных волн в продуктах взрыва, одна из которых отражается от оси симметрии, а две других распространяются к ней.

При инициировании цилиндрического заряда в точке на верхнем торце (рис. 3, *в*) так же, как и при двухточечном инициировании (рис. 3, *д*), распределения давления качественно подобны распределению полусферического заряда (см. рис. 3, *а*) с несколько различающимися положениями фронта вторичной УВ, распространяющейся к оси симметрии заряда.

В то же время при одноточечном инициировании в центре заряда (рис. 3, *з*) картина течения вновь усложняется — явно выделяются две вторичные волны, одна из которых отражается от оси симметрии, а вторая распространяется к ней.

Общей характеристикой всех вариантов расчета цилиндрического заряда (рис. 3, *б-д*) является то, что фронт основной УВ находится на расстоянии примерно 8 м, при этом давление на фронте колеблется в окрестности 0,8 МПа. Анализируя неоднозначный характер поведения давления за фронтом (особенно в вариантах 2 и 4), можно было бы ожидать, что наличие вторичных возмущений скажется на параметрах фронта основной УВ на большом удалении от центра взрыва.

На рис. 4, *а* в логарифмических координатах представлены законы изменения максимального избыточного давления на фронте воздушной УВ в зависимости от расстояния для всех вариантов расчетов. В результате анализа выявили, что

1) в ближней зоне ( $r \leq 2$  м) кривые 2 и 5 давления для зарядов, инициируемых на нижнем торце и на обоих торцах соответственно, совпадают и лежат ниже кривой 1 давления для полусферического заряда;

2) в промежуточной зоне ( $r = 2 \dots 3$  м) кривая 2 давления для заряда, инициируемого на нижнем торце, продолжает находиться ниже кривой 1 давления полусферического заряда, но они сближаются, а кривая 5 давления при двухточечном инициировании резко переходит на кривую 3 давления для заряда, инициируемого на верхнем торце;

3) в дальней зоне ( $r \geq 3$  м) кривые 2...5 давления для всех цилиндрических зарядов лежат выше кривой 1 давления для полусферического заряда, т.е. давление на фронте основной УВ цилиндрического взрыва превышает соответствующее давление при сферическом взрыве.

Что касается длительностей фазы сжатия  $\tau$ , представленных на рис. 4, *б*, то по характеру поведения кривых можно выделить два участка:  $r = 1 \dots 8$  м и  $r \geq 8$  м. На первом участке наблюдается сложный немонотонный характер изменения  $\tau$  для всех вариантов расчета, при котором трудно выделить какую-либо закономерность. На втором

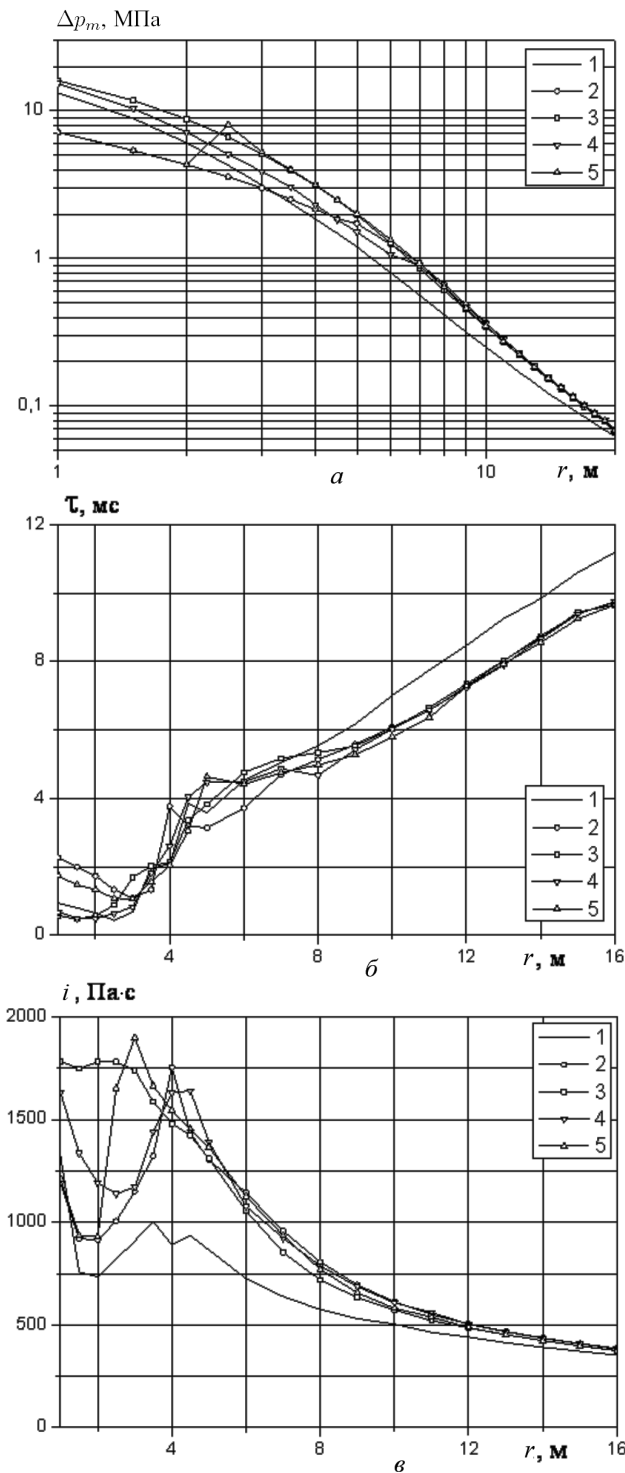


Рис. 4. Зависимости изменения максимального избыточного давления (*a*), длительности фазы сжатия (*б*) и удельного импульса фазы сжатия (*в*) от координаты фронта (1... 5 — номера вариантов, см. таблицу)

участке кривые 2...5 практически сливаются в одну кривую, которая проходит почти параллельно кривой 1, но лежит ниже нее. Это говорит о том, что на больших удалениях от центра взрыва сферическая УВ имеет бóльшую протяженность, чем цилиндрическая.

Наконец, на рис. 4, в приведены результаты расчетов удельного импульса положительной фазы избыточного давления  $i$ , которые показывают, что данный параметр для цилиндрического взрыва всегда выше сферического; на участке  $r = 1 \dots 5$  м наблюдается монотонный характер изменения импульса только в варианте 3; начиная с  $r \geq 5$  м, импульсы для цилиндрических зарядов близки и изменяются одинаково.

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что при взрыве на жесткой поверхности удлиненного цилиндрического заряда с отношением  $h_0/d_0$  порядка 10 максимальное избыточное давление на фронте воздушной УВ и удельный импульс фазы сжатия практически перестают зависеть от способа инициирования заряда, начиная с расстояний порядка 3,5 и 2,5 высоты заряда соответственно. В то же время они все-таки остаются заметно выше (от 10 до 40 %) соответствующих параметров при взрыве эквивалентного по массе полусферического заряда вплоть до расстояний  $(150 \dots 200)r_0$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Clare Knock, Nigel Davies*. Predicting the impulse from the curved surface of detonating cylindrical charges // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2011, vol. 36, pp. 105–109.
2. *Clare Knock, Nigel Davies*. Predicting the peak pressure from the curved surface of detonating cylindrical charges // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2011, vol. 36, pp. 203–209.
3. *Цикулин М.А.* Воздушная ударная волна при взрыве цилиндрического заряда большой длины // *ПМТФ*. 1960. № 3. С. 188–193.
4. *Васильев А.А., Ждан С.А.* Параметры ударной волны при взрыве цилиндрического заряда ВВ в воздухе // *ПМТФ*. 1981. № 6. С. 99–105.
5. *Герасимов Б.П., Левин В.А., Рождественская Т.И., Семушин С.А.* Взрыв цилиндрического заряда над твердой поверхностью // *ФГВ*. 1991. № 6. С. 131–134.
6. *Гельфанд Б.Е., Сильников М.В.* Фугасные эффекты взрывов. СПб.: ООО “Издательство “Полигон”, 2002. 272 с.
7. *Взрывные волны в открытом пространстве при неидеальной детонации высокоплотных смесевых составов, обогащенных алюминием / А.А. Борисов, А.А. Сулимов, М.К. Сукоян и др.* // *Химическая физика*. 2009. Т. 28, № 11. С. 59–68.
8. *Физика взрыва: в 2 т. / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др.; под ред. Л.П. Орленко.* Т. 1. М.: Физматлит, 2004. 832 с.

Статья поступила в редакцию 27.11.2012