

2. Частные вопросы конечной баллистики / В.А. Григорян, А.Н. Белобородько, И.Ф. Кобылкин и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.– 592 с.
3. Zaera R., Sanchez-Galvez V. Analytical modeling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal light-weight armours // International Journal of Impact Engineering. 1998, V.21. – P. 133–148.
4. Zaera R. Ballistic Impact on Polymer Matrix Composites, Composite Armor, Personal Armor / Impact Engineering of Composite Structures. Edited by S. Abrate. New York: Springer, 2011. – P. 305–403.
5. Rosenberg Z., Dekel E. Terminal ballistic. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – 323 p.
6. Sadanadan S., Hetherington J.G. Characterization of Ceramic/Steel and Ceramic/Aluminum Armours Subjected to Oblique Impact // International Journal of Impact Engineering. 1997, V.19. – P. 811–819.
7. Hetherington J.G., Lemieux P.F. The Effect of Obliquity on the ballistic performance of two component composite armours // International Journal of Impact Engineering. 1994, V.15. – P. 131–137.
8. Yaziv D., Chocron S., Anderson C.E., Grosch D.J. Oblique penetration in ceramic targets // Proc. of The 19<sup>th</sup> Int. Symp. on Ballistics. Inerlaken, Switzerland. 2001. P. 1257–1264.
9. Мерзиевский Л.А., Урушкин В. Особенности взаимодействия высокоскоростных частиц при .

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЗАРЯДА ВВ НА ПАРАМЕТРЫ ВЗРЫВА НАД ЖЕСТКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*В.Н. Охитин, С.С. Меньшаков*

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

### Аннотация

Проведено численное моделирование воздушного взрыва цилиндрического заряда ТНТ массой 100 кг с отношением высоты  $h_0$  к диаметру  $d_0$  порядка 10, расположенного вертикально на разной высоте  $h$  над поверхностью земли, моделируемой жесткой поверхностью. В начальный момент времени частицам заряда присваивалась вертикальная скорость в диапазоне 0...1 км/с, направленная к жесткой поверхности. Инициирование заряда осуществлялось по поверхности нижнего торца. Оценено влияние высоты подъема заряда и величины его скорости на параметры воздушной ударной волны (ВУВ) вдоль жесткой поверхности.

### Введение

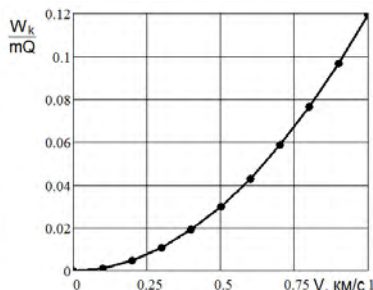
Настоящая работа является логичным продолжением работы [1], в которой проводилось численное моделирование взрыва неподвижного цилиндрического заряда ТНТ с теми же параметрами – массой 100 кг, плотностью  $\rho = 1630$  кг/м<sup>3</sup>, диаметром  $d_0 = 2r_0 = 200$  мм и высотой  $h_0 = 1952,82$  мм, инициируемого на верхнем торце и расположенного на разной высоте перпендикулярно жесткой поверхности, моделирующей землю.

Результаты расчетов показали, что при взрыве над жесткой поверхностью подобного удлиненного цилиндрического заряда, максимальное избыточное давление на фронте ВУВ и удельный импульс фазы сжатия практически перестают зависеть от высоты подъема заряда, начиная с расстояний порядка 1.5 и 2.5 высоты заряда соответственно. В тоже время они все-таки остаются заметно выше (от 10 до 40%) соответствующих параметров при взрыве эквивалентного по массе полусферического заряда на жесткой поверхности вплоть до расстояний  $250r_0$ .

Цель настоящего моделирования, проводимого с помощью AUTODYN – оценить влияние скорости подхода цилиндрического заряда ТНТ к поверхности земли на параметры ВУВ вдоль

поверхности. Анализ задачи показывает, что учет скорости подхода заряда к жесткой поверхности приводит к увеличению полной энергии заряда – к энергии взрыва добавляется кинетическая энергия заряда. Поскольку после детонации заряда материальным носителем этой дополнительной кинетической энергии являются продукты взрыва (ПВ), то можно ожидать, что некоторая часть кинетической энергии пойдет на увеличение параметров ВУВ.

На рисунке 1 приведено изменение отношения кинетической энергии заряда  $W_k$  к энергии взрывчатого превращения  $mQ$  в зависимости от скорости заряда  $V$  из диапазона реальных скоростей от 0 до 1000 м/с, при этом максимальная доля кинетической энергии соответствует скорости 1000 м/с и составляет ~ 12% от энергии  $mQ$ .



**Рисунок 1.** Отношение кинетической энергии заряда  $W_k$  к энергии взрывчатого превращения  $mQ$  в зависимости от скорости заряда  $V$

**Результаты расчетов**

На рисунке 2 приведена схема расположения заряда ТНТ над жесткой поверхностью. При инициировании на нижнем торце, процесс детонации развивается в направлении верхнего торца заряда, при этом параметры проходящей ВУВ в расчетах фиксировались датчиками, установленных на различных расстояниях вдоль жесткой поверхности.



**Рисунок 2.** Схема расположения заряда ТНТ над жесткой поверхностью

Расчеты проводились на эйлеровой сетке с размером ячейки 10x10 мм и продолжались до момента времени, когда на удалении 25 м от эпицентра взрыва на эпюрах избыточного давления полностью выделится фаза сжатия ВУВ, что составило ~ 250 радиусов заряда.

Верификация результатов расчетов проводилась путем сравнения с известными зависимостями Садовского [2] для максимального избыточного давления, удельного импульса и длительности фазы сжатия УВ.

На рисунке 3,а,б в логарифмических координатах представлены зависимости максимального избыточного давления  $\Delta p_m$  на фронте ВУВ вдоль жесткой поверхности от расстояния  $r$  для всех вариантов расчетов – здесь рисунок 3,а соответствует скорости заряда 0.5 км/с, а рисунок 3,б скорости 1 км/с.

Анализ их показывает, что:

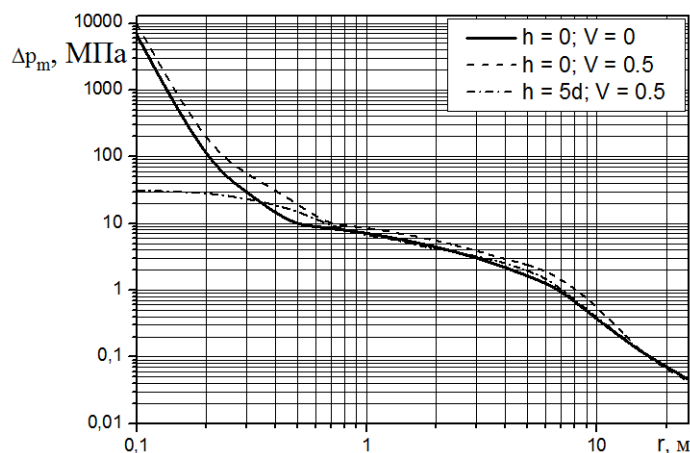
1. с увеличением скорости подхода заряда к жесткой поверхности  $V$  зависимости максимального избыточного давления от расстояния последовательно располагаются выше соответствующей кривой для неподвижного заряда, что говорит о вкладе части кинетической энергии заряда в общую энергию ВУВ;

2. чем выше значение скорости  $V$ , тем выше располагается соответствующая кривая  $\Delta p_m(r)$ .

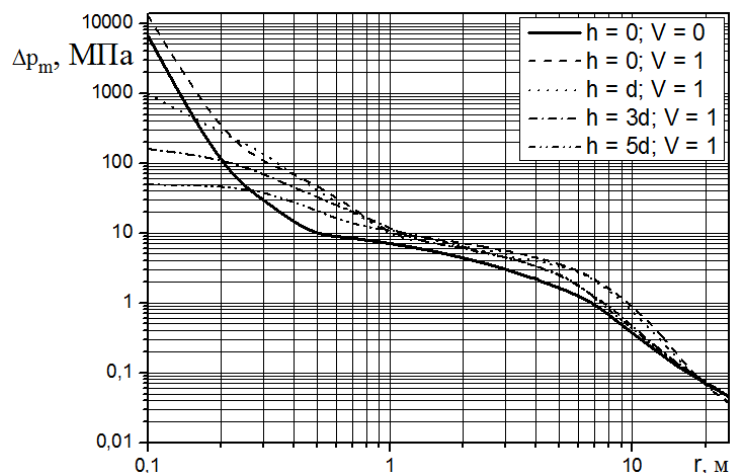
В отличие от неподвижного заряда [1], зависимость длительности фазы сжатия которого от расстояния имеет достаточно гладкий характер, соответствующие кривые для движущегося заряда имеют волнообразный характер, что говорит о существенной нестационарности структуры ВУВ.

На рисунке 4 приведены зависимости длительности фазы сжатия  $\tau$  от расстояния для всех вариантов расчета, из которых следует, что достаточно гладкие кривые в дальней зоне (больше 10 м или порядка 100 радиусов заряда) соответствуют неподвижному заряду [1] и зарядам, приподнятым на высоту, большую  $2d$ . Для всех остальных вариантов расчета на кривых наблюдаются локальные максимумы и минимумы вплоть до расстояний 250 радиусов заряда.

По-видимому, минимального расстояния, равного высоте подъема движущегося заряда над жесткой поверхностью в  $2d$  достаточно для преодоления ВУВ отмеченной выше нестационарности к моменту подхода ВУВ к отметке 100 радиусов заряда.

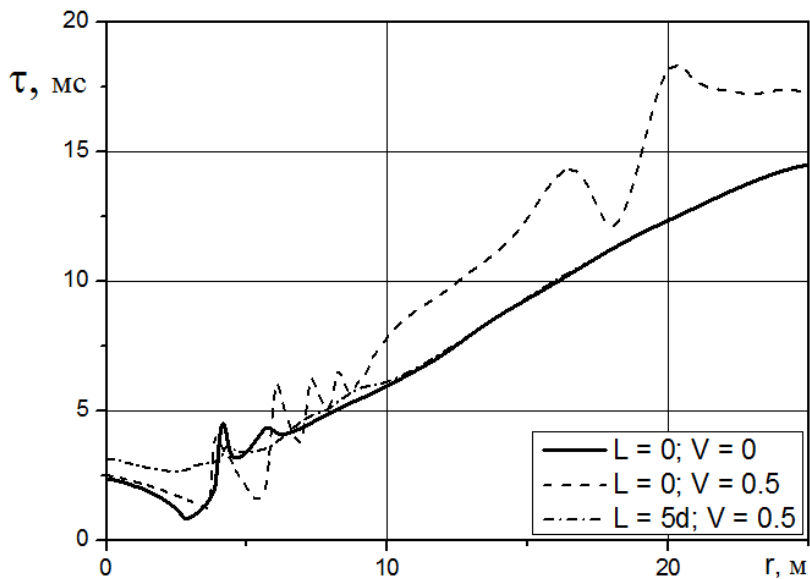


а)

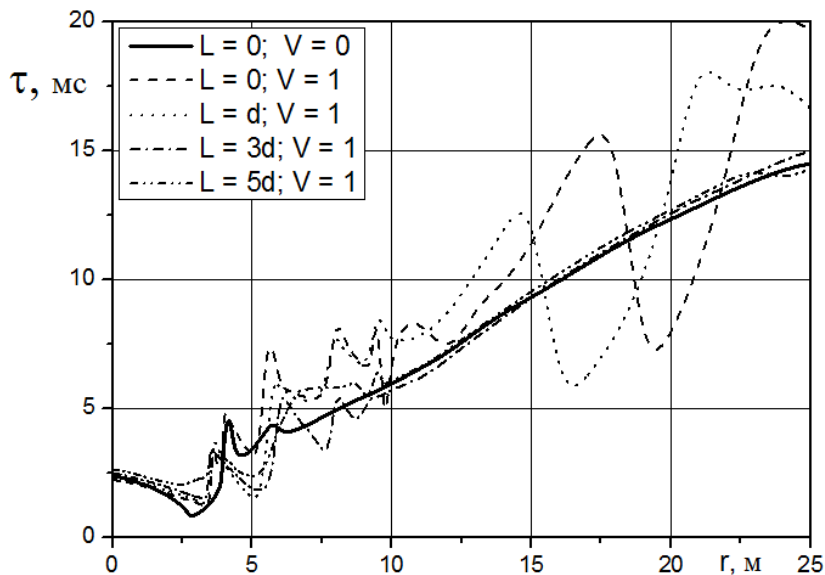


б)

**Рисунок 3 а, б.** Изменение максимального избыточного давления  $\Delta p_m$  на фронте воздушной УВ вдоль жесткой поверхности в зависимости от расстояния  $r$



а)



б)

**Рисунок 4,а,б.** Изменение длительности фазы сжатия  $\tau$  от расстояния  $\Gamma$

Удельный импульс ВУВ (рисунок 5,а,б) с увеличением скорости заряда возрастает (но только в ближней зоне до  $\sim 100$  радиусов заряда) по сравнению с неподвижным зарядом, сохраняя колебательный характер, отмеченный выше для фазы сжатия.

Однако, при увеличении высоты подъема движущегося заряда над жесткой поверхностью, амплитуда колебаний на кривых удельного импульса уменьшается, стремясь к единой кривой после отметки  $\sim 100$  радиусов заряда.

Таким образом, по результатам проведенного численного моделирования можно сделать вывод о том, что с увеличением скорости подхода заряда к жесткой поверхности, часть кинетической энергии заряда вкладывается в общую энергию взрыва и участвует в формировании ВУВ с повышенными параметрами вдоль жесткой поверхности.

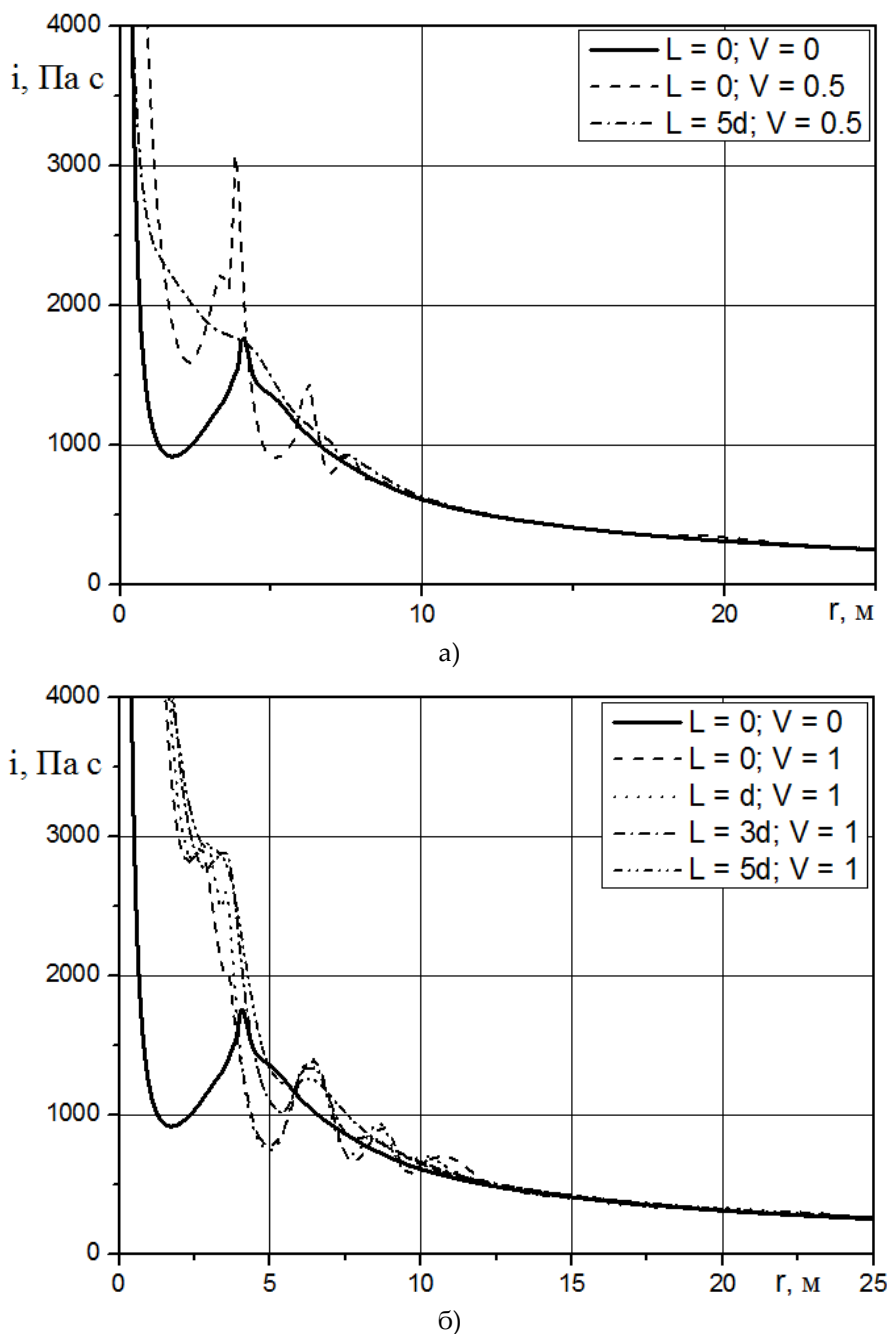


Рисунок 5,а,б. Изменение удельного импульса положительной фазы избыточного давления  $i$  от расстояния  $r$

#### Список литературы

1. В.Н. Охитин, С.С. Меньшаков. Параметры взрыва цилиндрического заряда над жесткой поверхностью // XV Харитоновские тематические научные чтения. Труды международной конференции. РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров. 2013. С. 621 – 626.
2. Физика взрыва / Под ред. А.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. Т. 1. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2004. – 832 с.