

Выводы

Таким образом, проведен комплекс экспериментальных и численных исследований влияния инъекции струй блочной ТДУ, истекающих с лобовой поверхности СА во встречный транс- и сверхзвуковой поток. Определены закономерности изменения донного давления за СА при различных конструктивных параметрах СА, ТДУ и режимах истечения струй.

Полученные результаты показали, что малоинтенсивная инъекция струй, как правило, приводит к уменьшению донного давления. При инъекции большого количества высоконапорных струй возможно незначительное повышение донного давления.

Расчеты, проведенные в пакете Solid Works Flow Simulation, показали хорошее совпадение измеренных и посчитанных осредненных значений донного давления и качественное совпадение структуры истекающих встречных струй.

Список литературы

1. Глаголев А. И., Зубков А. И., Сухановская Л. Д., Влияние расположения области тепломассоподвода в ближнем следе тела вращения на его донное давление и сопротивление. «Физика горения и взрыва», 2000, т. 36, №4, С. 23-30.
2. Запрягаев В. И., Локотко А. В., Особенности донных течений на многоструйной компоновке. Вестник ПНИПУ «Аэрокосмическая техника», 2016, №45, С. 193-206.
3. Сидняев Н. И., Исследование влияния поддерживающих устройств на донное давление моделей сверхзвуковых летательных аппаратов. МГТУ им. Н. Э. Баумана, письма в ЖТФ, 2013, т. 39, вып. 8, С. 17-23.
4. Гордеева Н.М. О задаче течения в донной области сверхзвуковых тел. Инженерный журнал: наука и инновации, 2015, вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/ahttp/1363.html>
5. Засухин О.Н., Булат П.В., Продан Н.В, История экспериментальных исследований донного давления. «Фундаментальные исследования», 2011, т.12, С. 670-674.
6. Калугин В.Т., Луценко А.Ю. Экспериментальные исследования обтекания спускаемых аппаратов при струйном управлении аэродинамическими характеристиками // Изв. РАН. Сер. МЖТ. – 1996. – № 3. С. 71-87
7. Луценко А.Ю., Назарова Д.К. Экспериментальное и численное моделирование обтекания спускаемого аппарата в трансзвуковом потоке при отсутствии и наличии блочного струйного торможения. Электронный научно-технический журнал «Инженерный вестник», 2014. № 12, С. 168-177. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/750279.html>
8. Луценко А.Ю., Назарова Д.К. Аэродинамические характеристики возвращаемого аппарата с работающей тормозной двигательной установкой при транс- и сверхзвуковом обтекании. Электронный научно-технический журнал «Инженерный журнал: наука и инновации». 2015. № 5 (41) URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/ahttp/1397.html>.

ЗАЩИЩАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КЕРАМИЧЕСКОГО СЛОЯ ЛЕГКОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ БРОНИ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОД УГЛОМ

И.Ф. Кобылкин, А.А. Горбатенко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Введение

Комбинированная броня, состоящая из лицевого керамического и тыльного энергоемкого металлического или композитного органопластикового слоев, является весьма эффективной защитой от действия бронебойных пуль, обладающих высокой проникающей способностью.

Высокая противопульная стойкость комбинированной брони с лицевым керамическим слоем обеспечивается наличием именно керамики, высокотвердого, но очень хрупкого материала. Особенности пробивания керамических слоев преград, обеспечивающими их высокую противопульную стойкость, являются задержка проникания ударника в преграду и разрушение керамики в области воздействия в форме усеченного конуса, обращенного меньшим основанием к лицевой поверхности преграды, на которую осуществлялось воздействие пули [1].

Основной объем исследований по изучению противопульной стойкости различных броневых преград, выполненных как в нашей стране, так и за рубежом, относится к воздействию пуль по нормали к поверхности преграды. Обусловлено это, по-видимому, тем, что стойкость наиболее часто используемых металлических броневых преград минимальна при воздействии кинетических средств поражения по нормали к преграде. При отклонении направления воздействия от нормали на угол θ толщина преграды b_θ в направлении воздействия возрастает пропорционально $\cos^{-1}\theta$ и в соответствии с этим возрастает ее защищающая способность. Опыт показывает, что в первом приближении для большинства однородных преград предельно пробиваемая толщина преграды $b_{пр}$ в направлении воздействия средства поражения не зависит от угла воздействия [2]. Тогда реальная толщина брони b , обеспечивающая защиту от данного средства поражения, будет равна

$$b = b_{пр} \cos \theta. \quad (1)$$

Поэтому для уменьшения массы бронезащиты военной техники всегда стараются увеличить угол наклона бронееlementов к возможному направлению воздействия кинетических средств поражения. Соотношение (1) иногда называют правилом баллистической эквивалентности [3, 4].

Возникает вопрос – справедливо ли это правило для комбинированных броневых преград с внешним керамическим слоем? Защищающая способность керамики определяется не только ее прочностным и инерционным сопротивлением прониканию средства поражения, но и временем задержки проникания t_p , в течение которого происходит разрушение головной части пули и формирование конической области разрушенной керамики, способствующей увеличению площади воздействия на последующие слои преграды.

Обзор экспериментальных данных

Экспериментальное изучение защищающей способности комбинированной брони с внешним керамическим слоем осуществляют, как правило, с использованием контрольной металлической плиты, располагаемой в контакте или с некоторым зазором относительно исследуемого бронееlementа (рисунок 1) [5]. Защищающую способность бронееlementа определяют сравнением базовой глубины проникания $l_{баз}$ средства поражения в контрольную плиту без бронееlementа с остаточной глубиной проникания в контрольную плиту $l_{ост}$, защищенную бронееlementом, при одной и той же скорости воздействия. В качестве безразмерной характеристики защищающей способности часто используют коэффициент массовой эффективности K_M , равный отношению поверхностной плотности пробиваемой части незащищенной контрольной плиты $\rho_{кп} l_{баз}$ к сумме поверхностных плотностей бронееlementа в направлении воздействия средства поражения и пробиваемой части контрольной плиты $\rho_{кп} l_{ост}$:

$$K_M = \frac{\rho_{кп} l_{баз}}{\frac{\rho_k h_k + \rho_{п} b_{п}}{\cos \theta} + \rho_{кп} l_{ост}},$$

где $\rho_{кп}$, ρ_k , $\rho_{п}$ – плотности соответственно контрольной плиты, керамики и подложки, на которую приклеивается керамика; h_k , $b_{п}$ – толщины керамического слоя и подложки.

Одной из первых работ, в которых было обнаружено отклонение от правила баллистической эквивалентности, была работа [6]. При обстреле под углом комбинированных бронееlementов из керамики Al_2O_3 со стальными и алюминиевыми подложками бронееlementами калибром 7,62 мм было установлено, что эквивалентная защищающая способность бронееlementов достигается при их большей поверхностной плотности, чем это следует из правила баллистической эквивалентности (1). Эквивалентная поверхностная плотность при обстреле под углом уменьшается

пропорционально $\sqrt{\cos \theta}$, не $\cos \theta$, как это требует правило баллистической эквивалентности (1). Соотношение между поверхностными плотностями q , обеспечивающими одинаковую защиту при воздействии пуля под углом q_θ и по нормали q_n согласно работе [6, 7] имеет вид: $q_\theta = q_n \sqrt{\cos \theta}$.

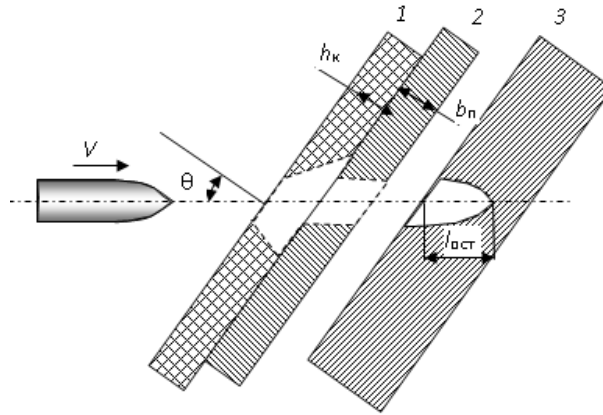


Рисунок 1. Схема экспериментального исследования защищающей способности комбинированной брони: 1 – керамика; 2 – подложка; 3 – контрольная плита

В работе [8] в серии экспериментов осуществлялся обстрел бронебойными пулями AP M2 калибром 7,62 мм по нормали и под углами 45° и 60° бронеэлементов из керамики Al_2O_3 , приклеенной на подложку из алюминиевого сплава 6061-T6. Толщина керамических элементов изменялась в пределах 3,1 – 9,2 мм, толщина алюминиевой подложки составляла 3,1 – 6,6 мм. Конструкция бронеэлементов выбиралась таким образом, что их поверхностная плотность в направлении воздействия для сравниваемых вариантов воздействия в нормаль и под углом сохранялась, примерно, одинаковой. Результаты экспериментов приведены на рисунке 2.

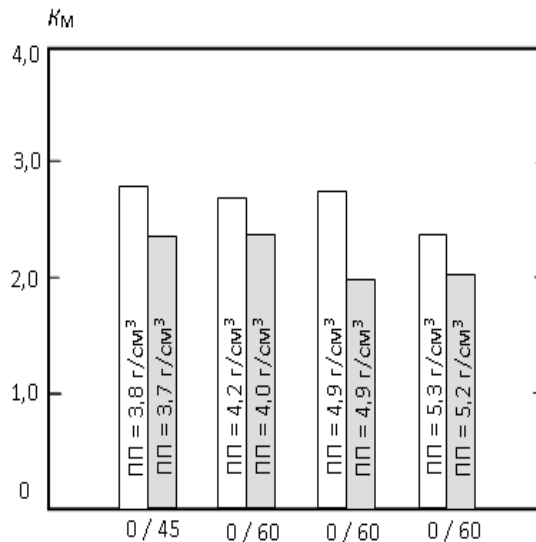


Рисунок 2. Коэффициенты массовой эффективности для бронеэлементов из слоя керамики Al_2O_3 , приклеенной к подложке из алюминиевого сплава 6061-T6, при воздействии бронебойных пуль AP M2 калибром 7,62 мм в нормаль и под углом (ПП – поверхностная плотность)

Бронеэлементы группировались вдоль горизонтальной оси в соответствии с возрастанием поверхностной плотности (ПП), по вертикальной оси для каждой группы бронеэлементов с близкими ПП в направлении воздействия откладывались коэффициенты массовой эффективности. Результаты позволяют сделать однозначный вывод о том, что при сохранении ПП на одном и том же уровне защищающая способность исследуемых бронеэлементов при воздействии в нормаль выше, чем при воздействии под углом. Прослеживается также тенденция уменьшения коэффициента K_m с увеличением поверхностной плотности бронеэлементов.

Понять обнаруженное отклонение от правила баллистической эквивалентности можно, распространив механизм разрушения керамики в конической области при нормальном воздействии на случай воздействия кинетического средства поражения под углом в соответствии с рисунком 3.

В связи с высокой скоростью распространения волн сжатия и разрежения в керамике (около 10 км/с) формирование разрушенной области при воздействии под углом будет осуществляться в конической области с осью симметрии, совпадающей с нормалью к поверхности преграды, проведенной через начальную точку ударного взаимодействия пули или ее сердечника с преградой (рисунок 3 б).

Факт нормализации области разрушения при наклонном ударе подтверждается разделением запреградных осколков, образующихся из разрушенной области преграды при ее высокоскоростном пробивании, на поток осколков, имеющих преимущественное направление скорости по нормали к поверхности преграды и поток фрагментов разрушенного ударника, направление скорости которых близко к первоначальной траектории ударника [9]. Симметрию области разрушенной керамики подтверждает также равномерное расположение радиальных трещин в круговой области лицевой поверхности с центром в точке первоначального контакта пули с керамическим слоем [3, 4].

Исходя из этого можно сделать вывод о том, что разрушение керамики осуществляется в волнах сжатия и разрежения, распространяющихся по нормали к поверхности и, следовательно, время задержки проникания, в течение которого происходит разрушение керамики [1], будет определяться толщиной слоя керамики независимо от его наклона к направлению воздействия пули. Поскольку в экспериментах, представленных в работах [6, 7], при воздействии под углом в бронеэлементах использовались более тонкие слои керамики, то они разрушались раньше по сравнению с керамическими слоями в бронеэлементах, воздействие на которые осуществлялось по нормали. Иными словами, в условиях эксперимента выполнялось неравенство $t_{p\theta} \leq t_{pn}$.

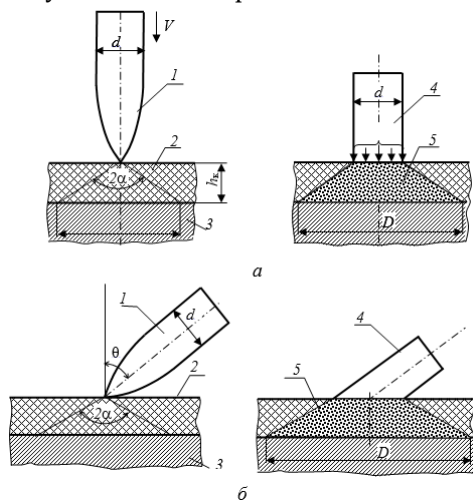


Рисунок 3. Формирование разрушенной области в слое керамики при воздействии пули по нормали (а) и под углом (б): 1 – пуля или ее сердечник; 2 – керамика; 3 – подложка; 4 – остаток пули или ее сердечника в момент начала их проникания в разрушенную керамику; 5 – разрушенная область

Следовательно, на начальной стадии при воздействии под углом пуля срабатывается (укорачивается) на меньшую длину, чем при воздействии по нормали. И, несмотря на то, что дальнейшее проникание через разрушенную керамику и подложку происходит вдоль одинакового пути, защищающая способность наклоненного бронеэлемента оказывается более низкой по сравнению с бронеэлементом, обстрел которого происходит по нормали к его поверхности. Подчеркнем, что этот вывод относится к бронеэлементам, толщины компонентов которых удовлетворяют правилу баллистической эквивалентности: $h_{к\theta} = h_{кн} \cos \theta$, $b_{п\theta} = b_{пн} \cos \theta$, где индексы n и θ относятся к бронеэлементам, обстрел которых производится по нормали (n) и под углом (θ).

Численное моделирование

Изучение взаимодействия ударника с керамико-металлической преградой под углом осуществлялось с помощью численного моделирования в программном пакете Ls-Dyna в трехмерной постановке. Для решения задачи использовался бессеточный метод Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Расстояние между центрами частиц составляло 0.4 мм.

В задаче керамический слой из корунда толщиной 8 мм, расположенный на подложке из алюминиевого сплава Al7075-T651 толщиной 4 мм, пробивался удлиненным ударником из стали У12а диаметром 6,5 мм и длиной 30 мм. Скорость ударника составляла 830 м/с. Анализировалось взаимодействие при углах наклона керамико-металлической брони в 30, 40 и 50 градусов. Уравнение состояния стали и алюминиевого сплава задавалось в форме Ми-Грюнайзена, их механическое поведение описывалось моделью Джонсона-Кука. Уравнение состояния керамики – полиномиальное, механическое поведение керамики описывалось с помощью модели Джонсона-Холмквиста. Значения констант моделей приведены в таблицах 1 и 2.

Результаты численного моделирования в основном подтвердили предполагаемый механизм взаимодействия ударников с комбинированными преградами с внешним керамическим слоем при воздействии под углом. Несколько неожиданным явился обнаруженный достаточно интенсивный разворот ударников на заключительных стадиях взаимодействия. Однако до получения экспериментального подтверждения к обнаруженному эффекту разворота ударников в слое керамики следует относиться как к возможному дополнительному механизму торможения ударников при воздействии под углом.

Таблица 1. Постоянные модели Джонсона-Кука

Постоянная	сталь У12а	Al7075-T651
Модель Джонсона -Кука		
Модуль сдвига G , ГПа	65,08	26,9
Плотность, кг/м ³	7810	2810
Предел текучести A , МПа	1370	520
Предел прочности, МПа	1570	572
B , МПа	476,8	477
n	0,18	0,52
C	0,012	0,0025
m	1	1,61
C_p	477	910
Комнатная температура, К	293	293
Температура плавления, К	1540	893
D_1	-0,8	0,096
D_2	2,1	0,049
D_3	-0,5	3,465
D_4	0,002	0,016
D_5	0,61	1,099
Предельные деформации ϵ_{min}	0,9	0,11

Таблица 2. Постоянные модели Джонсона-Холмквиста

Плотность, кг/м ³	3700	Предел прочности на растяжение, МПа	260
Модуль сдвига, ГПа	152	Предел Гюгонио, МПа	2460
<i>A</i>	0,93	<i>SFmax</i>	0
<i>B</i>	0,31	<i>D₁</i>	0,7
<i>C</i>	0,007	<i>D₂</i>	1,0
<i>M</i>	0,6	<i>K₁</i> , ГПа	130,9
<i>N</i>	0,6	<i>FS</i>	0,5

Результаты численного моделирования представлены на рисунках 4 – 6.

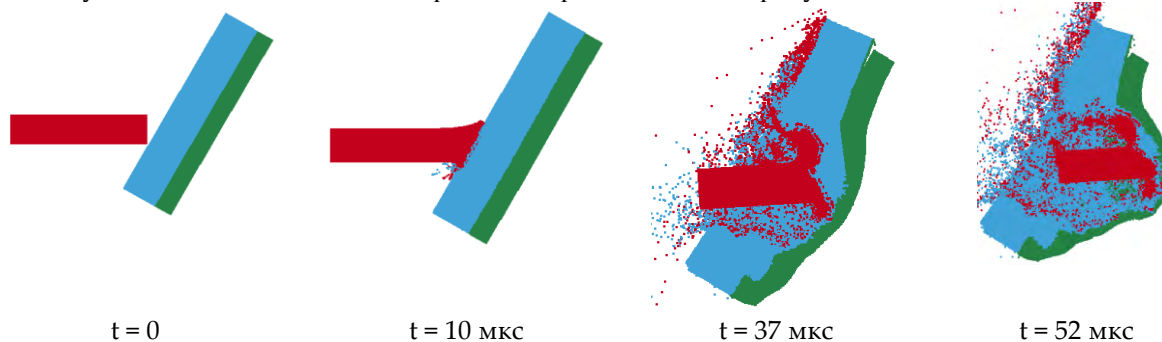


Рисунок 4. Стадии процесса взаимодействия стального ударника с керамико-металлической преградой под углом 30°

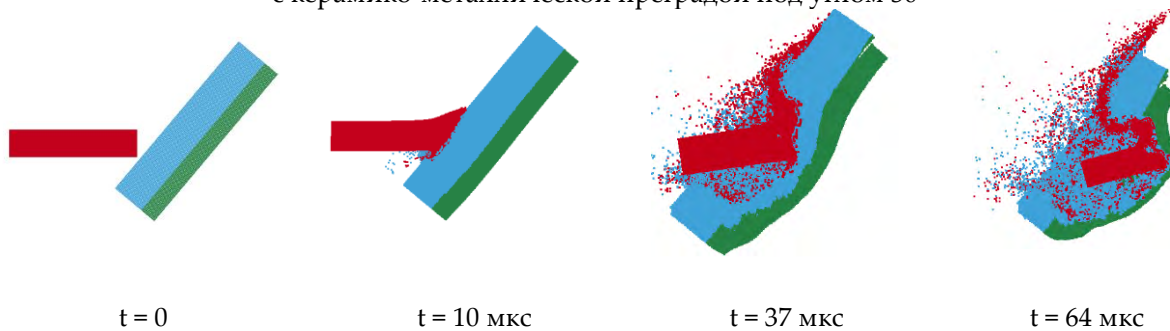


Рисунок 5. Стадии процесса взаимодействия стального ударника с керамико-металлической преградой под углом 40°

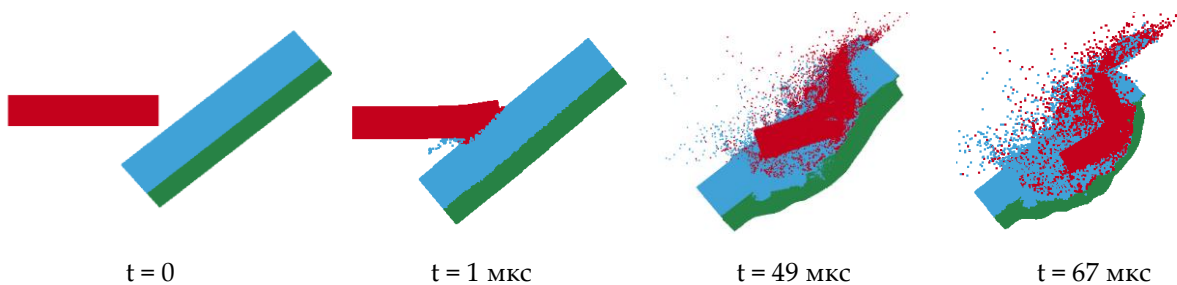


Рисунок 6. Стадии процесса взаимодействия стального ударника с керамико-металлической преградой под углом 50°

Список литературы

1. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 191 с.

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 19th 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/м³, 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