

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ БРОНЕБОЙНО-ЗАЖИГАТЕЛЬНОЙ ПУЛИ НА РАЗНЕСЕННЫЕ ПРЕГРАДЫ С УЧЕТОМ УГЛА АТАКИ

Е. П. Акашева, И. Н. Меркурьев, С. Е. Хазов

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Оценки параметров безопасности разнообразных технических систем при различных аварийных воздействиях, в том числе воздействиях пуль стрелкового оружия, являются весьма актуальными. Математическое моделирование в современных пакетах программ процесса пробития и проникания с учетом максимального количества влияющих на результат факторов представляет особый интерес, так как при разработке защитных структур позволяет оценить их оптимальные параметры и значительно снизить временные и материальные затраты. В статье представлены результаты моделирования с помощью ПП ЛОГОС процесса воздействия бронебойно-зажигательной пули с термоупрочненным сердечником на разнесенные преграды из стали 2П и алюминиевого сплава АМгб по нормали со скоростью ~ 750 м/с с углом атаки пули 4° . Проведено сравнение полученных в расчете данных с имеющимися экспериментальными данными.

Ключевые слова: численное моделирование, упрощенная модель Джонсона-Кука, пуля, разрушение, угол атаки.

В зарубежной литературе большое количество работ посвящено вопросам численного моделирования процессов пробития и проникания различных типов ударников в преграды из различных материалов со скоростями до 800 м/с, например, [1 – 4]. Данные работы содержат описание параметров расчетной модели прочности и разрушения, использование которой, с привлечением необходимого объема экспериментальных данных, позволяет на современном уровне с использованием численных методик решать поставленные задачи.

В отечественной литературе изучению различных аспектов процессов взаимодействия ударников и преград со скоростями до 1000 м/с посвящены, например, работы [5 – 10].

Цель настоящей работы – моделирование воздействия бронебойно-зажигательной пули с термоупрочненным сердечником (ТУС) на разнесенные преграды из стали 2П и алюминиевого сплава АМгб по нормали со скоростью ~ 750 м/с с углом атаки пули 4° , а также сравнение полученных в расчете данных с экспериментом. Предложена модель сердечника, разбитого на оживальную и цилиндрическую части с различными критериями разрушения, что позволяет сохранять носовую часть сердечника целой, а в цилиндрической части моделировать разрушение, соответствующее опытным данным.

Все расчеты проводились в трехмерной лагранжевой постановке с использованием пакета программ ЛОГОС.

1. Постановка задачи, параметры математической модели

1.1. Анализ экспериментальных данных показывает, что при ударе пули калибра 7,62 мм с ТУС по нормали к преграде толщиной до двух калибров пули и её пробитии для большинства металлов сердечник ведет себя как недеформируемое тело, а пробитие преграды происходит по типу прокола.

В случае, когда в начальный момент воздействия пули имеет некоторый угол атаки (между вектором скорости и осью симметрии пули) или угол соударения (между вектором скорости пули и лицевой поверхностью преграды), отличный от 90° , сердечник очень часто после пробития преграды вылетает разрушенным на части, то есть его уже нельзя считать недеформируемым.

Для иллюстрации данного эффекта на рис. 1 приведены фотографии, полученные в опытах [1] с бронебойной пулей класса BR7 калибра 7,62 мм, близкой по массово-габаритным и прочностным характеристикам к отечественной пуле калибра 7,62 мм с ТУС (твердость сердечника пули класса BR7 более 63 HRC). На рис. 1 показаны результаты покадровой съемки воздействия сердечника пули класса BR7 в поддоне на двухслойную металлическую броню 2х6 мм из стали Weldox 700E ($V_0 = 820$ м/с, угол соударения 90°). Авторы отмечают, что в опытах имел место угол атаки пули при подлете к преграде.

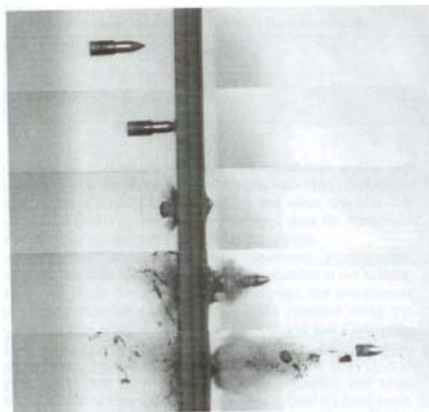


Рис. 1. Разрушение сердечника пули калибра 7,62 мм, выполненного из высокопрочной стали

Отметим, что разрушение сердечника произошло только в цилиндрической части сердечника, оживальная носовая часть практически не деформировалась.

Подобный тип разрушения описан в [7] для бронебойных подкалиберных снарядов при их проникании в броню. В частности, в [7] показано, что головная часть снаряда находится в процессе проникания по нормали в условиях, близких к равномерному всестороннему сжатию, что способствует сохранению ее целостности, исключая сдвиговую деформацию. По-видимому, наличие небольшого угла атаки, характерного для рассматриваемого в нашей работе типа пули, не меняет характера напряженно-деформированного состояния в носике сердечника.

Разрушение в цилиндрической части пули вызвано изгибными напряжениями, превышающими прочность материала, которые тем сильнее действуют на сердечник, чем больше угол атаки пули или угол соударения.

1.2. Для проведения численного эксперимента с учетом разрушения сердечника пули при воздействии с углом атаки рассмотрим две задачи, в которых ударник – отечественная бронебойно-зажигательная пуля калибра 7,62 мм с термоупрочненным сердечником из стали У12А-Т. Более подробно характеристики данной пули приведены в [11]. Рассмотрено два варианта преграды:

- вариант № 1 – двухслойная разнесенная, первый слой – сталь 2П толщиной 8 мм, второй слой – АМ г6 толщиной 2,5 мм, зазор – 105 мм;
- вариант № 2 – двухслойная разнесенная, первый слой – сталь 2П толщиной 8 мм, второй слой – сталь 2П толщиной 8 мм, зазор – 52 мм.

Начальная скорость воздействия 750 м/с, угол соударения 90° , угол атаки пули 4° . Начальная геометрия расчетной модели задач приведена ниже на рис. 2.

Основная задача при моделировании разрушения сердечника пули – получить зарегистрированное в опытах его дробление в цилиндрической части без значительного изменения носика.

Рассматриваемая задача моделируется с помощью пакета программ ЛОГОС в трехмерной лагранжевой постановке с плоскостью симметрии. Преграда моделируется прямоугольными пластинами с жесткой заделкой по периметру (ограничения по всем степеням свободы). Для контроля

за искривлением сетки по типу песочных часов используется вязкостное сглаживание с выделением режима возмущения. Для сеточного разбиения используются объемные восьмиузловые шестигранные элементы. Характерный размер счетных ячеек в области воздействия не более 0,3 мм как в ударнике, так и в преграде. Для уменьшения времени счета на краях преграды заданы более крупные элементы. Поперечный размер преграды составляет не менее 15-ти диаметров ударника, чтобы избежать воздействия волн разгрузки. Трение не учитывается, так как оно оказывает достаточно слабое влияние на основные процессы, исследуемые в данной постановке.

Для описания сдвиговой прочности всех материалов использовалась упрощенная модель Джонсона – Кука, для моделирования разрушения материалов преграды и оболочки пули задавался критерий эффективных пластических деформаций, для разрушения материала сердечника пули использовался критерий главных напряжений. В табл. 1 приведены значения основных характеристик материалов, использованные в расчетах.

Таблица 1

Значения физико-механических характеристик материалов

Материал	ρ , кг/м ³	E , ГПа	μ	A , МПа	B , МПа	n	C	ϵ_p , %	σ_1 , ГПа
Сталь У12А-Т – сердечник пули	7850	210	0,3	3000	1430	1	0,1	-	5
Сталь 3 – оболочка пули	7800	210	0,3	340	350	0,45	0,015	70	-
Сталь 2П	7800	210	0,3	1000	308	0,64	0,010	100	2
АМгб	2640	70	0,3	160	600	0,75	0,044	30	-

В расчетной модели пули учтены сердечник из стали У12А-Т и оболочка из стали 3. При этом оживальная и цилиндрическая часть сердечника задаются материалом с разными условиями разрушения: в оживальной части разрушение отсутствует, в цилиндрической задан критерий разрушения по главным напряжениям (смотри таблицу 1) Все остальные свойства частей сердечника идентичны. Использование согласованной сетки (узел в узел) в месте соединения оживальной и цилиндрической частей сердечника позволяет избежать возможного искусственного разрушения. Данный подход позволяет сохранить носик сердечника неразрушенным, что важно для его пробивной способности в случае воздействия на многослойные разнесенные преграды, а также уменьшить влияние «эрозии» материала сердечника, связанное с работой критерия разрушения.

2. Результаты численного моделирования, сравнение с опытными данными

2.1. На рис. 2 приведена начальная геометрия расчетной модели задач (рис. 2а и 2б) и качественные картины деформирования на некоторые моменты времени. В результате сравнения с имеющимися опытными данными можно отметить следующее.

В расчете с преградой № 1, как и в опытах, получено пробитие обоих слоев преграды. Сердечник пули достиг второго слоя к моменту времени 194 мкс, в опыте ко времени 208 мкс. Сердечник разрушился на фрагменты, его носик практически не деформировался после пробития первого слоя преграды, во втором слое образовалось два отверстия от воздействия осколков сердечника, что также соответствует опытам.

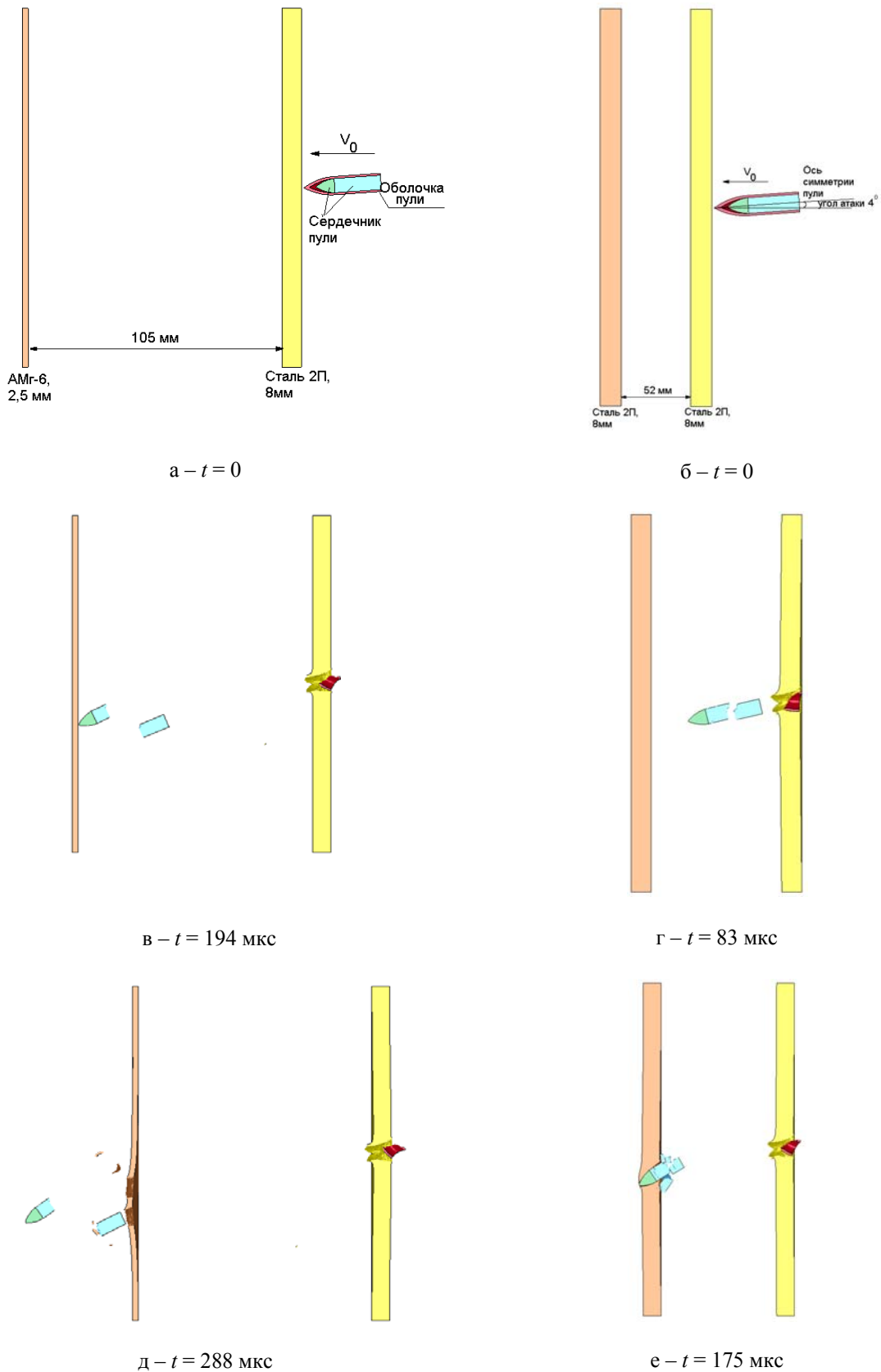


Рис. 2. а, в, д – результаты расчета с вариантом преграды № 1;
 б, г, е – результаты расчета с вариантом преграды № 2

В расчете с преградой № 2, как и в опытах, сердечник разрушился на фрагменты после пробития первого слоя, второй слой не пробит. Время касания фрагментами сердечника второго слоя преграды в опытах 104 – 112 мкс, в расчете 109 мкс.

Размеры отверстий в слоях преграды в обои расчетных случаях соответствуют опытным значениям и составляют 8 – 10 мм.

2.2. Таким образом, в обеих задачах полученные качественные и количественные данные, характеризующие процесс деформирования слоев преграды, соответствуют имеющимся опытным данным. Характер разрушения сердечника пули также соответствует результатам экспериментов.

3. Выводы

3.1. В процессе численного моделирования взаимодействия пули с ТУС калибра 7,62 мм с защитными структурами одной из задач является описание разрушения ее термоупрочненного сердечника, которое часто имеет место в опытах при наличии начального угла атаки пули или угла соударения, отличного от 90°. Решение данной задачи позволит адекватно учитывать процессы, происходящие в ударнике и в преграде в рассматриваемых задачах, что может быть учтено при разработке систем защиты, особенно многослойных разнесенных конструкций, от воздействия аналогичных поражающих элементов.

3.2. Результаты трехмерных расчетов задачи воздействия пули калибра 7,62 мм с термоупрочненным сердечником на двухслойную разнесенную металлическую преграду со скоростью 750 м/с по нормали с учетом угла атаки пули показали, что основные параметры динамического деформирования и разрушения преград и ударников, кинематические параметры ударника согласуются с данными соответствующих экспериментов.

При этом благодаря тому, что разрушение сердечника пули моделируется только в цилиндрической части, в расчетах удалось избежать потери массы и искажения формы носовой части сердечника, что также способствовало получению близких к опытам характеристик пробития.

3.3. Используемые в данной работе параметры расчетной модели могут в дальнейшем применяться и уточняться в процессе численного моделирования при проектировании перспективных систем защиты.

Литература

1. Borvik T., Dey S., Clausen A. H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles // *Int. J. Imp. Eng.* – 2009. – V. 36. – P. 948 – 964
2. Tria D. E., Trebinski R. Methodology for experimental verification of steel armour impact modeling // *Int. J. Imp. Eng.* – 2017. – V. 100. – P. 102 – 116.
3. Rosenberg Z., Ashuach Y., Yeshurun Y., Dekel E. On the main mechanisms for defeating AP projectiles, long rods and shaped charge jets // *Int. J. Imp. Eng.* – 2009. – Vol. 36. – P. 588 – 596.
4. Børvik T., Hopperstad O. S., Berstad T., Langseth M. A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration // *Eur. J. Mech. A/Solids.* – 2001. – Vol. 20. – P. 685 – 712.
5. Витман Ф. Ф., Степанов В. А. Влияние скорости деформирования на сопротивление деформированию металлов при скоростях удара $10^2 - 10^3$ м/с // *АН СССР. Некоторые проблемы прочности твердого тела.* – 1959.
6. Сагомоян А. Я. Проникание. – М.: Изд-во МГУ, 1974.
7. Григорян В. А., Белобородько А. Н., Дорохов Н. С. и др. Частные вопросы конечной баллистики. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
8. Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
9. Моссаковский П. А., Антонов Ф. К., Беякова Т. А., Костырева Л. А., Брагов А. М., Баландин В. В. Экспериментальное исследование и конечно-элементный анализ тканых композитов в условиях ударного нагружения // *Проблемы прочности и пластичности.* – 2014. – Вып. 76 (1).

10. Харченко Е. Ф., Ермоленко А. В. Композитные, текстильные и комбинированные бронематериалы. Том 1. Механизмы взаимодействия с баллистическими поражающими элементами. – М.: Изд-во ЗАО «Армированные композиты», 2013.

11. Акашева Е. П., Бухарев Ю. Н., Корсакова Е. И., Циберев К. В. Применение пакета программ ЛОГОС для трехмерного моделирования задач взаимодействия ударников с металлическими преградами со скоростями 750 – 1330 м/с. // XIII Международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование»: сб. докл. Саров, 2012.

MODELLING OF THE ARMOUR-PIERCING INCENDIARY BULLET IMPACT WITH YAW ANGEL ON SPACED TARGETS

E. P. Akasheva, I. N. Merkuryev, S. E. Khazov

Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

The assessment of safety parameters of various technical systems under some emergency actions, including the impact of small arms bullets, is relevant. Numerical simulation of penetration problems using actual codes taking into account the large quantity of factors which influence on the result is of interest, since the armour design simulation can significantly reduce time and material costs. The aim of the work is to simulate the normal impact of armour-piercing incendiary bullet with a heat-strengthened core on the spaced steel 2P and AMg6 targets at ~ 750 m/s velocity with a bullet yaw angle 4° . Also it is necessary to compare the data obtained in the simulation with the experiment. The simulation was made by LOGOS.

Keywords: numerical simulation, simplified Johnson-Cook model, bullet, fracture, yaw angel.

УДК 519.6

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ НИМФА

А. В. Баранов, О. И. Бутнев, М. Л. Сидоров, В. А. Пронин

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В статье описывается гидрологический модуль в составе ПК НИМФА, состоящий из блока поверхностного стока и блока, описывающего течение в открытых каналах. Обозначается область применения. Также приводятся результаты расчета задачи и двух тестов.

Ключевые слова: гидрологический модуль, НИМФА, поверхностный сток, течение воды по открытым каналам.

Модуль расчета поверхностного стока в ПК НИМФА [1].

Расчетный модуль поверхностного стока в составе ПК «НИМФА» разрабатывается в рамках контракта с ГК «Росатом».