

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПУЛЬ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ ПРИ РИКОШЕТЕ

А.А. Демин¹, И.А. Титов², П.В. Верещагин²

¹ АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск

² Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», г. Бийск

Разработка математических моделей разрушения неоднородных конструкций при динамических нагрузках является актуальной задачей для различных областей науки и техники. В настоящее время для задач подобного типа все чаще используют моделирование методами конечных элементов в явной постановке. Однако большое количество параметров модели и их широкий диапазон приводят к проблеме выбора их рациональных значений. В статье рассмотрено численное моделирование разрушения двух- и трехэлементных пуль патронов стрелкового оружия при малых углах соударения с преградой. Результаты моделирования могут быть использованы для анализа поражающей способности существующих и разрабатываемых конструкций пуль и их элементов.

Ключевые слова: моделирование, рикошет, пули патронов стрелкового оружия.

ВВЕДЕНИЕ

Рикошет представляет собой соударение пули с твердой или жидкой преградой, сопровождающееся обратным отражением от этой преграды [1].

В зависимости от требований к поражающей способности совершенствование конструкций пуль ведется по двум противоположным направлениям:

- увеличение вторичного поражения от осколков пули и рикошета осколков пули при стрельбе в недоступные ограниченные непробиваемой преградой пространства нахождения противника [3];

- снижение опасности поражения окружающих при проведении операций органами охраны правопорядка путем уменьшения рикошетирования пуль и вероятности разлета убойных фрагментов при сохранении пробивного действия пуль [4].

Несмотря на взаимоисключающие предъявляемые требования в том и другом случае необходима оценка поражающей способности, которая базируется на информации по целостности или фрагментации пули в целом и ее элементов, а так же кинетической энергии фрагментов пули после рикошета. Для определения кинетической энергии фрагментов пули необходимо знать их размеры, скорость и ее направление. Очевидно, что решить такую задачу аналитически невозможно, требуется трехмерное моделирование динамического процесса взаимодействия пули с преградой, ее частичного разрушения и последующего движения разделившихся фрагментов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Моделирование разрушения пули при соударении с преградой является динамической, контактной и требующей учета больших перемещений и деформаций задачей. Наиболее перспективным методом расчета таких задач является метод конечных элементов. Поэтому для моделирования процесса соударения

использовалась конечно-элементная программа LS-DYNA. Создание конечно-элементной модели в LS-DYNA включало в себя следующие основные этапы: создание геометрических объектов, их сборка, определение для каждого из них механических свойств материала, выбор типа конечного элемента, вида контактного взаимодействия, разбиение их конечно-элементной сеткой, а так же задания граничных условий в виде начальной скорости и ограничения перемещения узлов преграды.

Для построения модели в этой программе был выбран трехмерный 8-ми узловый тип конечного элемента, позволяющий реализовать возможность разрушения, при этом максимальной размер элемента ударника не превышал 0,5 мм. Следует отметить, что фрагменты пули, которые после соударения с преградой имели размер меньше размера конечного элемента, разрушались полностью без сохранения объема и не принимались во внимание в дальнейшем расчете.

При моделировании использовалась упруго-пластическая билинейная модель материала сердечника, биметалла оболочки пули и преграды (MAT_PLASTIC_KINEMATIC) [5] позволяющая учитывать кинематическое упрочнение по модели Купера-Саймондса (Cowper-Symonds) [6]:

$$\sigma_T^d = \sigma_T \left(1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \right)$$

где $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации; σ_T – предел текучести; σ_T^d – динамический предел текучести; C – характерная скорость деформации; P – параметр скоростного упрочнения.

Вероятность разрушения оценивалась по критерию исчерпаемого ресурса пластичности материала:

$$\psi = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{i\text{кр}}(\eta)} 100 \leq 100\%,$$

где ε_i – накопленная интенсивность деформации; ε_{ip} – интенсивность деформации разрушения.

$$\varepsilon_{ip} = 2\varepsilon_p \cdot e^{-0.72\eta},$$

где ε_p – деформация разрушения при испытании образцов материала на растяжение

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

где $\sigma_{1, 2, 3}$ – главные напряжения; σ_i – интенсивность напряжений.

$$\varepsilon_p = \ln\left(\frac{1}{1-\delta}\right),$$

где δ – относительное сужение при испытании образца материала на растяжение.

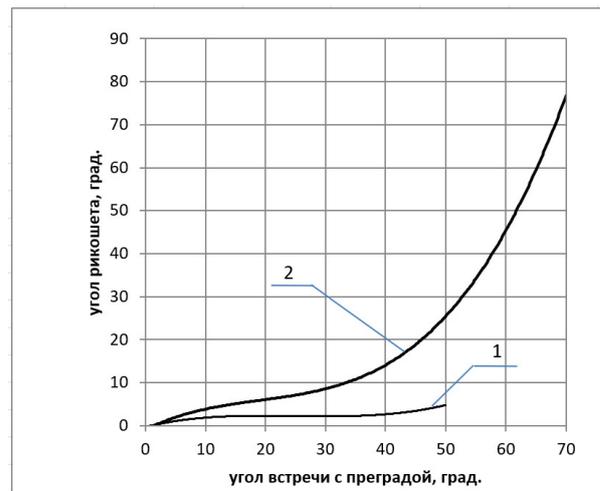
При моделировании поведения свинцового сердечника (для двухкомпонентной пули) и свинцовой рубашки (для трехкомпонентной пули) использовалась упругопластическая гидродинамическая модель материала (MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO) с дополнительным критерием разрушения по величине эффективной пластической деформации и величине максимального сжимающего напряжения (MAT_ADD_EROSION).

Для задания контакта между элементами ударника и преградой использовался основанный на методе штрафов (penalty-based contact) тип контакта *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE [5] с учетом коэффициента трения f , зависящего от относительной скорости контактных поверхностей:

$$f = f_c + (f_c - f_d)e^{-k \cdot |V_{отн}|},$$

где k – коэффициент экспоненциального затухания; f_c – коэффициент статического трения; f_d – коэффициент динамического трения; $V_{отн}$ – относительная скорость контактных поверхностей.

В процессе моделирования взаимодействия пули с преградой был установлен критический угол падения. Критический угол падения – это максимальный угол встречи ударника с преградой, при котором возможно отражение ударника от преграды с сохранением хотя бы одним из фрагментов ударника энергии достаточной для нанесения существенных повреждений на расстоянии 3 метра от точки соударения (более 10 Дж).



1 – пуля со свинцовым сердечником; 2 – пуля со стальным сердечником

Рис. 1. Зависимость угла рикошета элементов пули от угла встречи с преградой при скорости соударения с преградой 750 м/с

Полученные результаты показывают (см. рис. 1), что при угле встречи с преградой более 50° градусов пуля со свинцовым сердечником разрушается на большое количество мелких элементов, совокупная кинетическая энергия которых менее 10 Дж. У пули со стальным сердечником этот угол составляет – 70°. Таким образом, критический угол падения у пули со свинцовым сердечником примерно на 20° меньше, чем у пули со стальным сердечником. Это говорит о меньшей поражающей способности пули со свинцовым сердечником после рикошета при встрече с преградой с большим углом падения.

Результаты численного моделирования рикошета для оценки поражающей способности пули от угла встречи с преградой представлены на (рис. 2).

Для оценки поражающей способности пули был предложен [2] критерий R – отношение суммарной кинетической энергии фрагментов пули после соударения, имеющих энергию достаточную для нанесения существенных повреждений, к кинетической энергии пули до рикошета:

$$R = \frac{m_1 \cdot v_1^2 + m_2 \cdot v_2^2 + \dots + m_n \cdot v_n^2}{M \cdot V^2},$$

где m_n – масса отраженного фрагмента пули; v_n – скорость отраженного фрагмента пули; M – масса пули до соударения; V – скорость пули пред соударением.

При малых углах встречи с преградой, примерно до 10°, кинетическая энергия отраженной пули остается высокой, пуля идет параллельно преграде, поражающая способность фрагментов пули близка к единице.

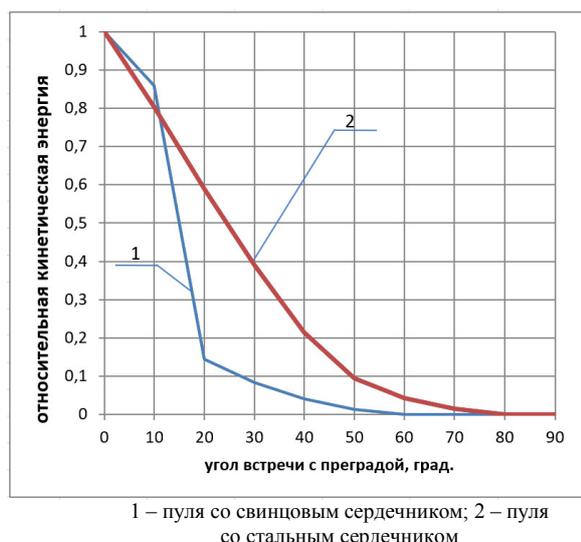


Рис. 2. Зависимость кинетической энергии отраженных элементов пули от угла встречи при скорости соударения с преградой 750 м/с

При углах встречи с преградой более 10^0 градусов поражающая способность пули со свинцовым сердечником резко падает и становится меньше поражающей способности пули со стальным сердечником. С увеличением угла падения различие возрастает. Можно утверждать, что в диапазоне углов встречи от 10^0 до 70^0 поражающая способность пуль со свинцовым сердечником намного меньше, чем пули со стальным сердечником.

Причины изменения поражающей способности рикошетирующих пуль выявлены при качественном анализе характера взаимодействия пуль с преградой (рис. 3-4). На рисунках представлены: пуля в момент подлета к преграде; форма пули или форма ее фрагментов после контакта с преградой.

При угле встречи с преградой менее 10^0 как двухэлементная, так и трехэлементная пули сохраняют свою целостность и высокую поражающую способность после рикошета. В пуле содержащей свинцовый сердечник происходит перераспределение свинца по внутреннему объему оболочки, при этом оболочка не разрушается и потери массы сердечника практически не происходит.

При угле падения более 10^0 происходит разрыв оболочки, «разбрызгивание» свинцового сердечника, ведущее к потере массы поражающих фрагментов (рис. 3-а), это резко снижает поражающую способность рикошетирующей пули.

С увеличением угла падения пуль фрагментация их увеличивается, фрагменты становятся меньше (рис. 4), уменьшается и их энергия, все это снижает поражающее действие рикошетирующих пуль. При этом пули со свинцовым сердечником, при тех же самых условиях, фрагментируются на большее количество элементов, большая часть которых не имеет на расстоянии 3-х метров достаточной кинетической

энергии для нанесения существенных повреждений (т.е. не обладает убийственным действием).

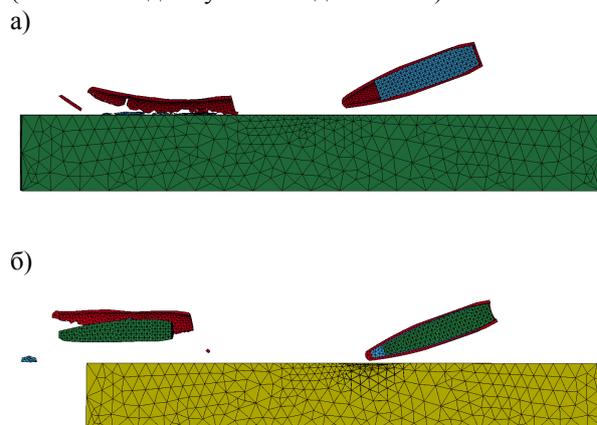


Рис. 3. Характер фрагментации и направление рикошета пули со свинцовым а) и стальным б) сердечниками после соударения под углом 20^0

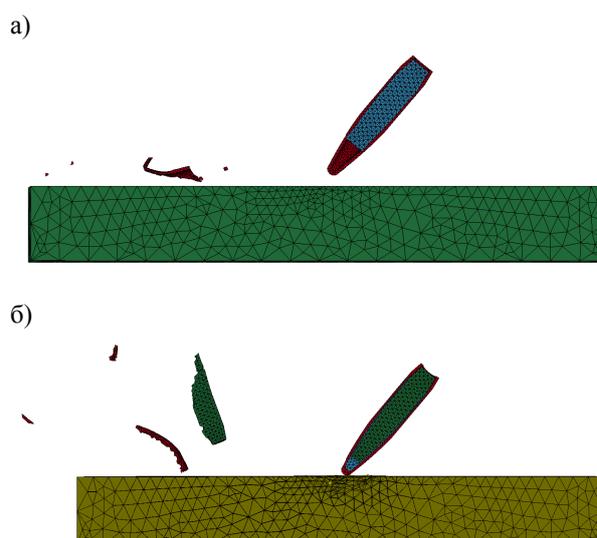


Рис. 4. Характер фрагментации и направление отскока пули со свинцовым а) и стальным б) сердечниками после соударения под углом 50^0

При соударении с преградой пули со свинцовым сердечником, сначала происходит отделение головной части оболочки по месту ее утонения. Одновременно с процессом отрыва, происходит деформирование свинцового сердечника, приводящее к продольному разрыву оболочки пули по местам контакта с нарезами канала ствола. После чего происходит значительное деформирование с разрушением свинцового сердечника и дальнейшее его разделение на мельчайшие части.

Оболочки пуль, содержащие стальной сердечник подвергаются разрушению при меньших углах встречи с преградой, что снижает их поражающую способность, хотя различие по отношению к пулям со свин-

цовым сердечником минимально. При увеличении угла встречи с преградой пуля со стальным сердечником происходит дальнейшее рассеивание кинетической энергии, стальной сердечник существенно деформируется, но сохраняет целостность и высокое поражающее действие вплоть до критического угла падения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель позволяет качественно и количественно определить при рикошете характер разрушения пули, содержащих неоднородные по типу материала элементы.

В частности установлено, что основным отраженным элементом у пули со стальным сердечником является деформированный, частично потерявший массу, но монолитный стальной сердечник, имеющий кинетическую энергию после соударения сопоставимую с энергией пули до рикошета. Основными отраженными фрагментами пули со свинцовым сердечником является части оболочки. Сердечник при углах встречи с преградой более 10° разрушается на мельчайшие частицы, имеющие низкую плотность кинетической энергии.

Рикошетирующая способность пули со свинцовым сердечником снижена по сравнению с пулей, содержащей стальной сердечник, в 4,2 раза при скорости соударения 750 м/с и угле встречи с преградой 20° , и в 5,25 раза при той же скорости и угле встречи 40° .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Burke, T. W. and Rowe, W. F. Bullet Ricochet: A Comprehensive Review // *Journal of Forensic Sciences*, JFSCA - Vol. 37. - No. 5, pp. 1254-1260, September 1992
2. Демин, А.А. Рикошетирующая способность пули стрелкового оружия / А.А. Демин, П.В. Верещагин, И.А. Титов // Научно-технический сборник Боеприпасы. – 2013. – №1. – С. 68–74
3. Пат. 2410633 Российская Федерация, МПК F42B30/02. Пуля патрона стрелкового оружия [Текст] / Курилов Е.Н., Доронин В.Т.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Барнаульский патронный завод». - 2009118180/11; заявл. 13.05.09; опубл. 27.01.11, Бюл. № 3.
4. Пат. 2372580 Российская Федерация, МПК F42B 5/02, F42B 12/34. Патрон стрелкового оружия [Текст] / Захарьящев В. В., Каинов Н. Г., Степанов Н. В., Хадисов М. А., Яшкин В. А.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Барнаульский патронный завод». - 2008147591/02; заявл. 02.12.08; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 31.
5. LS-DYNA Keyword User's Manual, LSTC, Version R7.0. Livermore, CA, vol. I-II, 2013.
6. Diertenberger, M. Development of a high strain-rate dependent vehicle model / M. Diertenberger, M. Buyuk, C-D Kan. – LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2005, В-III-1-10.

Демин Андрей Александрович к.т.н., ведущий инженер-конструктор, E-mail: presskov@mail.ru, Россия, г. Бийск, АО «ФНПЦ «Алтай»;

Титов Игорь Анатольевич к.т.н., доцент, доцент кафедры РДВУАС, E-mail: titov@bti.secpa.ru, Россия, г. Бийск, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

Верещагин Павел Викторович к.т.н., доцент, доцент кафедры РДВУАС, E-mail: vpv@bti.secpa.ru, Россия, г. Бийск, Бийский тех-

нологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

MODELING OF DESTRUCTION OF SMALL ARMS BULLETS AT RICOCHET

A.A. Demin¹, I A. Titov², P.V. Vereshchagin²

1. FR&PC «Altai», Biysk

2. Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk

Abstract: The article describes the numerical simulation of the destruction of two- and three-element bullets of small arms ammunition at small angles of impact with an obstacle. The simulation results can be used to analyze the damaging ability of existing and developed designs of bullets and their elements.

Index terms: modeling, ricochet, bullets.

REFERENCES

1. Burke, T. W. and Rowe, W. F. "Bullet Ricochet: A Comprehensive Review," *Journal of Forensic Sciences*, JFSCA, vol. 37, no. 5, pp. 1254-1260, Sept. 1992.
2. Demin, A. A., Vereshchagin, V. P., and Titov, I. A., "Ricochet Ability of Small Arms Bullets," *Scientific and Technical Collection of Articles "Ammunition"*, no. 1, pp. 68-74, 2013
3. Doronin, V.T., and Kurilov, E. N., "Fire Arm Round Bullet," RU Patent 2 410 633, May 13, 2009
4. Zakhar'jashchev, V. V., Kainov, N. G., Stepanov, .N. V., Khadisov, M. A., Jashkin, V. A., "Small Arms Cartridge," RU Patent 2 372 580, December 02, 2008
5. LS-DYNA Keyword User's Manual, LSTC, Version R7.0. Livermore, CA. vol. I-II, 2013.
6. Diitenberger, M. Development of a high strain-rate dependent vehicle model / M. Diitenberger, M. Buyuk, C-D Kan. – LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2005, B-III-1-10.

Demin Andrei Alexandrovich - Ph.D., Leading Design Engineer, FR&PC «Altai», e-mail: presskov@mail.ru, Russia, Biysk,;

Titov Igor Anatolyevich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor REHDAS, E-mail: titov@bti.secna.ru, Russia, Biysk, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

Vereshchagin Pavel Viktorovich Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of REHDAS Department, E-mail: vpv@bti.secna.ru, Russia, Biysk, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University;