



АСМОЛОВСКИЙ
Николай Александрович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ASMOLOVSKIY
Nikolay Aleksandrovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



БАСКАКОВ
Владимир Дмитриевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

BASKAKOV
Vladimir Dmitriyevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ТАРАСОВ
Владимир Алексеевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

TARASOV
Vladimir Alekseevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

Анализ влияния периодических возмущений на формирование высокоскоростных стержневых элементов

Н.А. Асмоловский, В.Д. Баскаков, В.А. Тарасов

Путем численного трехмерного моделирования взрывного нагружения менисковых облицовок исследовано влияние периодических волнообразных неравномерностей профиля облицовки на образование складок у высокоскоростных стержневых элементов, формируемых в результате нагружения. Предложен подход к учету малых искажений геометрии при моделировании задач с высокими скоростями деформаций. Учет разрушения позволил выявить диапазон допустимых значений амплитуд начальных неравномерностей, приводящих к формированию целостного элемента, а также определить области наиболее вероятного разрушения элемента. Установлены наиболее рациональные типы меридиональных профилей менисковых облицовок. Предложены методы формирования неравномерностей малой амплитуды на облицовках.

Ключевые слова: стержневой элемент, периодические складки, искажение сеток.

The impact of periodic disturbances on the formation of high-speed rod elements

N.A. Asmolovskiy, V.D. Baskakov, V.A. Tarasov

A computer simulation of 3D dynamic explosive loading of meniscus linings is performed to investigate the effect of periodic wave-like profile ripples of cladding on the formation of folds in high-speed rod elements as a result of their loading. An approach to accounting for small distortions of the geometry in problems with high strain rates is proposed. Accounting for the destruction made it possible to determine the range of amplitudes of initial irregularities for the entire element formation and to find the areas of the maximum likelihood damage of an element. The most reasonable types of meridional profiles of meniscus linings are established. The methods for the formation of small-amplitude ripples on claddings are suggested.

Keywords: rod element, periodic folds, grid distortion.

Для решения различных технических задач широкое применение находят высокоскоростные ($M_\infty > 5...6$) стержневые элементы (ВСЭ), которые можно использовать, например, для разрушения крупногабаритного космического мусора и метеоритов, применять в военных целях для уничтожения техники и инженерных сооруже-

ний. Во всех случаях необходимо обеспечить высокую точность попадания ВСЭ в цель. При этом дальности полета ВСЭ до цели могут достигать значений $L > (500...1000)l$, где l — длина ВСЭ. В таких условиях реализовать требуемую точность попадания в цель невозможно без демпфирования случайных и систематических возмущений, действующих на ВСЭ при формировании и полете.

Одно из наиболее распространенных устройств формирования ВСЭ основано на использовании энергии взрыва, позволяющего свернуть облицовку менисковой формы в полый стержень и разогнать его до скоростей порядка 2 000...2 500 м/с (рис. 1). Для демпфирования возмущений и повышения аэродинамической устойчивости ВСЭ целесообразно сформировать периодические меридиональные складки в его кормовой части [1—6]. Это можно сделать за счет неравномерности скорости периферийной части облицовки в окружном направлении во время взрывного обжатия облицовки. Даже малые отклонения от осевой симметрии геометрии взрывного устройства или нагрузки, действующей при инициировании заряда на облицовку, оказывают значительное влияние на конфигурацию ВСЭ, так как динамическое обжатие облицовки сопряжено с потерей ее устойчивости. При этом складки ВСЭ могут образовываться самопро-

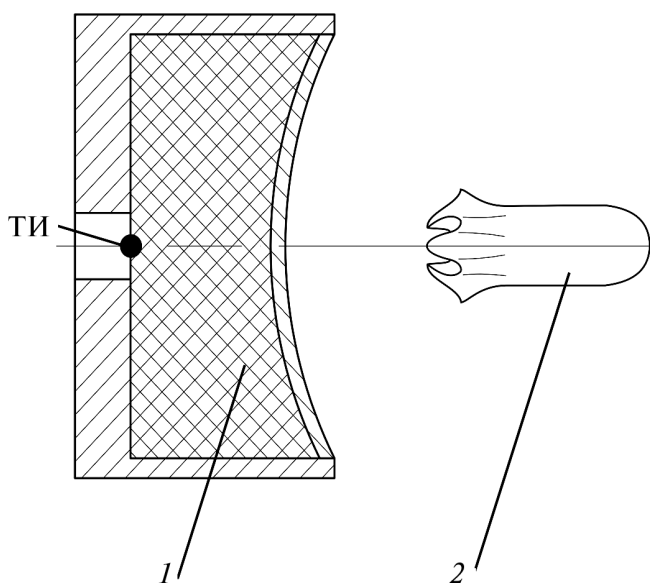


Рис. 1. Устройство (1) для формирования ВСЭ (2): ТИ — точка инициирования

извольно под влиянием несовершенств технологической природы, что можно наблюдать экспериментально [7]. Однако технологические погрешности случайны по величине и не могут служить основой для целенаправленного формирования регулярных складок со стабильными геометрическими характеристиками.

Анализ патентных и технических источников показывает, что одним из наиболее рациональных методов провоцирования складок в кормовой части ВСЭ является применение облицовок с продольными меридиональными возмущениями [4]. Внесение периодических возмущений в другие детали и узлы взрывного устройства технически, как правило, более сложно и сопряжено со значительными затратами денежных средств и временных ресурсов.

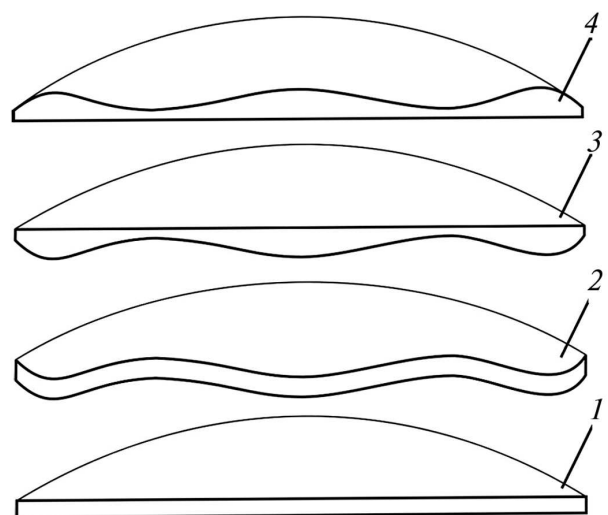


Рис. 2. Облицовки для взрывного формирования ВСЭ:

1 — осесимметричная менисковая облицовка;
2—4 — облицовки без осевой симметрии

Можно выделить три характерные конфигурации волнообразных профилей облицовок, активирующие два механизма формирования складок в ВСЭ (рис. 2):

1) облицовка постоянной толщины с волнообразной периферийной частью (профиль по типу 1). Складкообразование в кормовой части ВСЭ при использовании таких облицовок происходит вследствие разновременности прихода детонационной волны к элементам облицовки, имеющим одинаковую радиальную координату;

2) облицовки переменной толщины с волнообразной либо внутренней, либо наружной поверхностью и с противолежащей гладкой поверхностью (профили, соответственно, по типу 2 и 3). При неравномерностях на внутренней поверхности облицовки складкообразование ВСЭ происходит вследствие неравномерности метаемой массы облицовки. В случае складчатой наружной поверхности этот механизм формирования складок ВСЭ дополняет неравномерность прихода детонационной волны.

В рамках данной работы с помощью численного моделирования исследовано влияние облицовок с указанными волнообразными возмущениями малой амплитуды (минимальные амплитуды прогибов облицовки составляют 0,1% ее толщины) на геометрию и целостность формируемого взрывом ВСЭ.

Расчеты выполнялись в программном комплексе LS-Dyna в системе координат Лагранжа. Численные расчеты проводились в рамках следующих основных положений и допущений:

1) зачастую моделирование задач механики сплошных сред с большими скоростями деформаций проводится в Эйлеровой системе координат. Однако учет геометрических неравномерностей малой амплитуды в трехмерной постановке не позволяет использовать Эйлеровы сетки вследствие чрезмерно высоких требований по густоте. Кроме того осложняется и моделирование контакта продуктов детонации (ПД) с облицовкой. В связи с этим был выбран Лагранжев подход, позволяющий точно описать геометрию тел при умеренном числе элементов в расчетной области. Классические численные алгоритмы контакта в Лагранжевой постановке не позволяют точно описывать взаимодействие тел на скоростях, характерных для задач взрывного нагружения. Поэтому вычисления проводились в два этапа. На первом этапе, где происходил основной энергетический обмен между ПД и облицовкой, и где расчетная сетка претерпевала лишь умеренные искажения, использовался механизм «склейки» степеней свободы расчетной сетки ПД и облицовки на границе их контакта. На втором этапе, когда влияние продуктов детонации на ха-

рактер движения облицовки становилось незначительным (начиная с момента приобретения центром масс облицовки максимальной скорости), расчеты проводились только для облицовки в условиях ее инерционного движения;

2) применялся специально разработанный механизм автоматического преобразования исходной конечно-элементной сетки и внедрения в нее периодических возмущений. Поскольку в системе координат Лагранжа конечные элементы обладают высокой чувствительностью к искажению сетки и склонны к эффектам «локинга» [8], то для исследований было выбрано максимально упрощенное взрывное устройство цилиндрической формы, образующее ВСЭ. Геометрия такого заряда определяется следующими параметрами: его радиусом R_2 и высотой H_2 , радиусом R_1 и высотой H_1 заряда взрывчатого вещества, радиусом кривизны R_0 и толщиной δ облицовки.

Расчетная сетка для взрывного устройства создавалась в два этапа. На первом этапе генерировалась расчетная сетка для цилиндрических тел, составляющих корпус устройства, а также «заготовки» заряда взрывчатого вещества и облицовки. На втором этапе расчетная сетка «заготовок» деформировалась в соответствии с конфигурацией облицовки и заряда взрывчатого вещества (ВВ) (рис. 3);

3) профиль облицовки и прилегающая поверхность заряда взрывчатого вещества формировались при деформировании расчетной сетки «заготовок» по следующей зависимости:

$$z(r, \gamma) = \frac{r}{R} A \cos n\gamma,$$

где z — добавочная высота облицовки; R — радиус основания облицовки; A — амплитуда складки; n — количество складок; r и γ — полярные координаты точки складчатой поверхности облицовки.

Добавочная высота z использовалась в качестве дополнительного слагаемого к координате каждого узла сетки облицовки. Методом суммирования координат создавались три указанных типа складок на облицовках. Для наглядности на рис. 4 представлены примеры та-

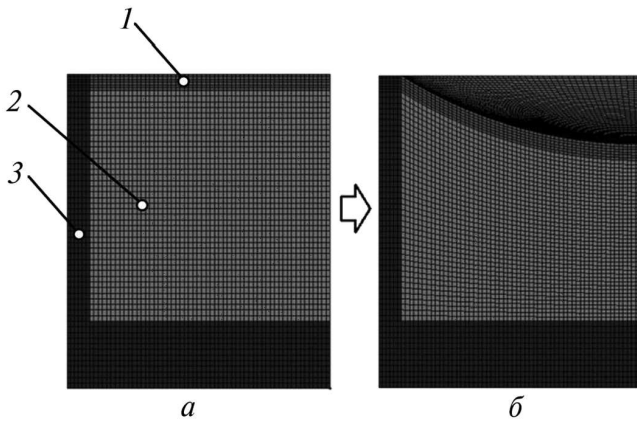


Рис. 3. Порядок формирования расчетной сетки:
 а — исходная сетка цилиндрической формы;
 б — сетка после деформирования; 1 — облицовка;
 2 — заряд ВВ; 3 — корпус

ких облицовок с деформированной расчетной сеткой и возмущениями амплитудой 50% толщины;

4) для описания упругопластического деформирования материала облицовки применялась модель MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO (MAT_010), реализованная в пакете LS-Dyna [9]. В соответствии с моделью MAT_010, закон пластического течения материала имеет следующий вид:

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_h \bar{\epsilon}^p + (a_1 + pa_2) \max[p, 0],$$

где $E_h = \frac{E_\tau E}{E - E_\tau}$; E — модуль Юнга; σ_y — предел текучести; σ_0 — предел текучести в нормальных условиях; E_h — модуль пластического

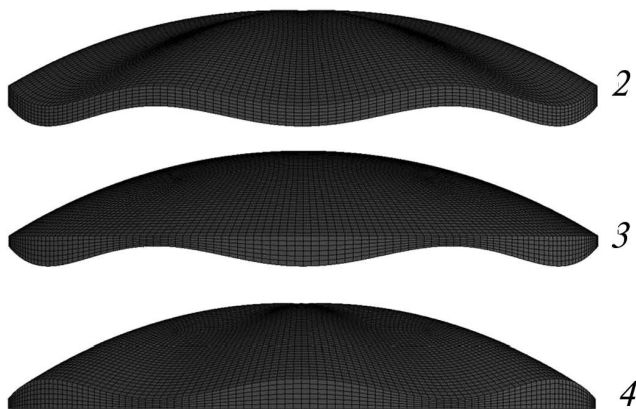


Рис. 4. Варианты расчетных сеток для облицовок с возмущениями:

2 — облицовка постоянной толщины;
 3, 4 — облицовки переменной толщины

упрочнения; E_τ — касательный модуль; $\bar{\epsilon}^p$ — значение эффективной пластической деформации; a_1 и a_2 — коэффициенты линейного упрочнения; p — давление (при сжатии $p > 0$).

Реализация модели включает в себя алгоритм математической эрозии, описываемой следующим неравенством:

$$\bar{\epsilon}^p < \epsilon_{\max}^p,$$

где ϵ_{\max}^p — максимально допустимая величина эффективной пластической деформации.

При проведении расчетов материалы деталей взрывного устройства, а также их параметры, принимались согласно данным работы [10];

5) в процессе численного моделирования использовались механизмы разрушения, реализованные в численной модели материала — откол и численная эрозия. Численная эрозия может быть использована для предварительной оценки разрушения [11]. Базируясь на рекомендациях работ [10, 11] и результатах численных экспериментов, принималось $\epsilon_{\max}^p = 1,75$.

Проверку адекватности результатов численных расчетов проводили путем сравнения конфигурации ВСЭ, формируемых из гладких менисковых облицовок, с экспериментальными данными работы [12]. Расчеты выполнялись для трехмерного случая. Параметры взрывного устройства № 1, использовавшегося при выполнении расчетов и экспериментов, представлены в таблице. Анализ расчетных и экспериментальных форм ВСЭ в различные моменты времени показал их удовлетворительное совпадение (рис. 5). Кроме того, было установлено, что конечно-элементная сетка обладает высоким качеством и тип конечного элемента был выбран правильно, поскольку облицовка в процессе обжатия сохраняла свою симметрию значительный период времени. По результатам расчетов был оценен период времени формирования ВСЭ — приблизительно 100 мкс.

Геометрические параметры устройств формирования ВСЭ, мм

№ п/п	R_1	H_1	R_2	H_2	R_0	δ
1	25	29	29	48	36	2,7
2	32	33	35	42,1	68,5	2,4

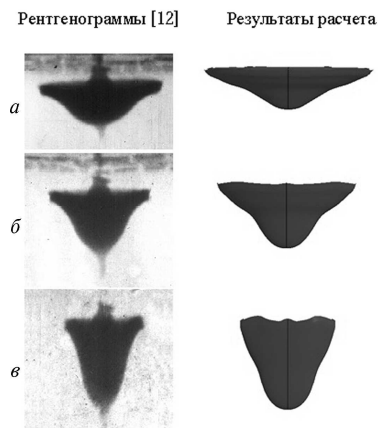


Рис. 5. Конфигурация ВСЭ на стадии формирования в различные моменты времени ($t = 0$ — момент иницирования заряда):

$a - t = 22$ мкс; $б - t = 24$ мкс; $в - t = 32$ мкс

Принятые допущения позволили провести численные исследования по влиянию периодических неравномерностей профиля облицовок на формирование ВСЭ. Расчеты проводились для каждого из трех типов профилей для взрывного устройства № 2, представленного в таблице. Главной задачей расчетов являлась оценка влияния амплитуды геометрического возмущения облицовки на факт образования и величину сформированной складки ВСЭ.

Выполненные исследования показали, что неравномерность метаемой массы (неравномерность по типу 2, 3) оказывает большее влияние на глубину образовавшихся складок, чем разновременность прихода детонационной волны (неравномерность по типу 1) (рис. 6). Причем различие между результатами расчетов для профилей облицовок по типу 2 и 3 минимально. По существу, складки ВСЭ формируются при начальных периодических возмущениях практически любой, сколь угодно малой амплитуды, поскольку процесс динамического обжатия даже гладкой менисковой облицовки является неустойчивым, склонным к складкообразованию.

Следует отметить, что динамика развития складок ВСЭ различная для разных видов облицовок с волнообразными возмущениями. На начальных этапах обжатия облицовка с профилем по типу 1 ведет себя аналогично осесимметричному случаю и складки ВСЭ начинают формироваться спустя 40 мкс (рис. 7). Обли-

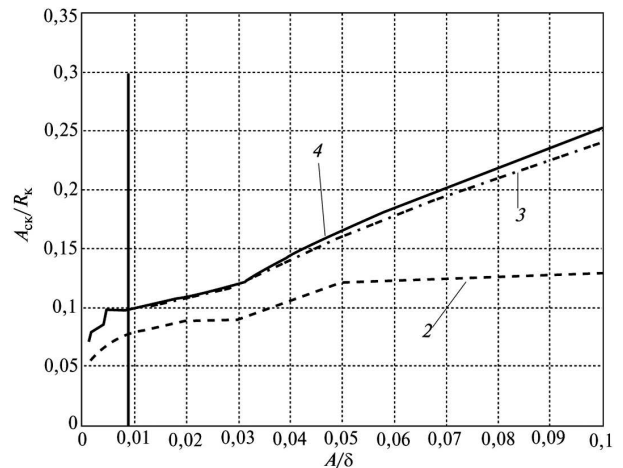


Рис. 6. Влияние амплитуды A неравномерности облицовки на амплитуду складки $A_{ск}$ в кормовой части ВСЭ:

2 — облицовка постоянной толщины;
3, 4 — облицовки переменной толщины с неравномерностями на наружной или внутренней поверхности

цовки с профилем по типу 2, 3 формируют видимые складки гораздо раньше — уже на 20 мкс (рис. 8).

Вертикальная линия на рис. 6 указывает приблизительно границу диапазона, в котором нарушалась целостность ВСЭ при $\epsilon_{max}^p = 1,75$. Левее этой границы разрушения материала облицовки при формировании ВСЭ не происходило. Справа от границы диапазона происходило разрушение элемента, реализованное при помощи механизма численной эрозии и откола. При этом очаги разрушения материала зарождались в области вершин складок (рис. 9). Такое расположение очагов разрушения материала приводит к отделению складчатой кормовой части от ВСЭ, т. е. вызывает его

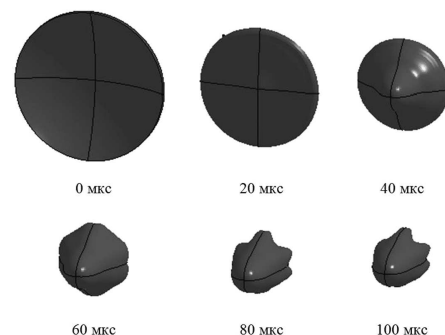


Рис. 7. Особенности изменения формы облицовки при формировании ВСЭ в различные моменты времени при профиле облицовки по типу 1

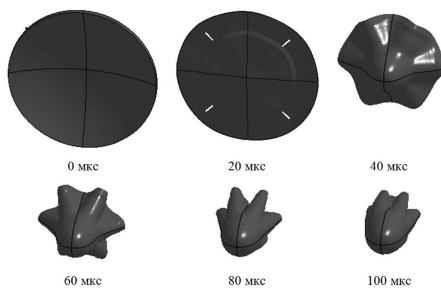


Рис. 8. Особенности изменения формы облицовки при формировании ВСЭ в различные моменты времени при профиле облицовки по типу 2 и 3

разрушение в осевом направлении, а также способствует дефрагментации отделившейся кормы.

Выполненные исследования показали, что предельное значение амплитуды складок облицовки для анализируемого заряда без разрушения ВСЭ составляет около 0,5% толщины облицовки (см. рис. 6). При этом максимально достижимая амплитуда складки в кормовой части ВСЭ не превышает 10% среднего радиуса кормы.

Отметим также, что полученные результаты носят оценочный характер и требуют экспериментального уточнения, поскольку при проведении расчетов использовалось упрощенное, нерациональное по конструкции взрывное устройство и применялся весьма грубый деформационный критерий прочности материала облицовки.

Незначительный по амплитуде рельеф на поверхности облицовки, необходимый для формирования складок ВСЭ, может вызвать сложности при его практической реализации. Например, для облицовки толщиной 3 мм при амплитуде складок 0,5% толщины максимальный перепад между впадинами и выступами рельефа на поверхности облицовки составит 30 мкм. Для создания столь малого по амплитуде рельефа (складки по типу 2 и 3) можно рекомендовать различные технологии нанесения покрытий на облицовку постоянной толщины в местах выступов. При этом физические характеристики материалов покрытия и облицовки должны быть близкими, а покрытия обладать хорошей прочностью сцепления с облицовкой. Представляется также технически возможным формирование «псевдоскладок» на облицовке путем наклеивания на ее гладкую

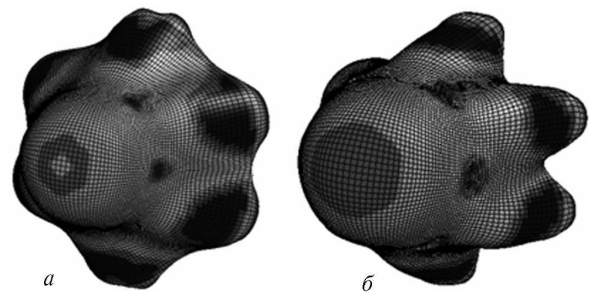


Рис. 9. Типовые распределения интенсивности пластических деформаций в различные моменты времени в условиях разрушения ВСЭ:

$a - t_1 = 40 \text{ мкс}$; $b - t_2 = 65 \text{ мкс}$

поверхность в местах предполагаемых выступов полос металлической фольги.

Выводы

1. Для численной оценки влияния нарушения симметрии облицовки на формирование высокоскоростного стержневого элемента предложено использовать предварительно сформированные лагранжевые сетки со «склежкой» степеней свободы расчетной сетки заряда и облицовки на границе раздела. Показано, что в этом случае можно моделировать влияние периодических неравномерностей геометрии облицовки амплитудой порядка 0,1% ее толщины и более.

2. Численными расчетами установлено, что наиболее благоприятными для формирования складчатой кормовой части высокоскоростного стержневого элемента являются облицовки менисковой формы, имеющие периодические меридиональные неравномерности волновой формы на внутренней или наружной поверхности и гладкую противоположающую поверхность.

3. Определены условия формирования периодических складок в кормовой части высокоскоростного стержневого элемента без его разрушения. Показано, что целостность высокоскоростного стержневого элемента обеспечивает амплитуда складки на облицовке не более 0,5% ее толщины.

Литература

1. Bender D., Chouk B., Fong R., Ng W., Rice B., Volkmann E. Explosively Formed Penetrators with Canted Fins // 19-th International Symposium of Ballistics. Switzerland, 2001. P. 755–762.

2. Insert for a projectile-forming charge; патент № US4590861 A; США. 06/606,355; Заявл. 2.05.1984; Опубл. 27.05.1986. 5 с.

3. Shoot-through cover for an explosively formed penetrator warhead; патент № US5925845 A; США. 08/905,174; Заявл. 01.08.1997; Опубл. 20.07.1999. 11 с.

4. Arrangement for production of explosively formed projectiles; патент № US4982667 A; США. 07/268,453; Заявл. 19.08.1983; Опубл. 8.01.1991. 6 с.

5. Warhead; патент № US4622901 A; США. 06/676,663; Заявл. 13.11.1983; Опубл. 13.11.1986. 3 с.

6. Inserts for coating an explosive charge, and forming a rod-shaped projectile, and process for manufacture of inserts; патент № US4714019 A; США. 06/886,903; Заявл. 18.07.1985; Опубл. 22.12.1987. 4 с.

7. Jun W., Jingbo L., Yixin D. Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively-formed projectile // *International Journal of Impact Engineering*. 2007. Vol. 34. No. 7. P. 1147—1162.

8. Babuška I., Suri M. On locking and robustness in the finite element method // *SIAM J. Numer. Anal.* 1992. Vol. 29. No. 5. P. 1261—1293.

9. Hallquist J., LS-Dyna. Keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation. <http://www.lstc.com/>. Дата обращения 22.04.2013. С. 2546.

10. Колпаков В.И., Баскаков В.Д., Шикунов Н.В. Математическое моделирование функционирования снарядоформирующих зарядов с учетом технологических асимметрий // *Оборонная техника*. 2010. № 1—2. С. 82—89.

11. Nandlall D., Wong G. A Numerical Analysis of the Effect of Erosion Strain on Ballistic Performance Prediction. 1999. Department of National Defence. Canada. С. 28.

12. Колпаков В.И., Баскаков В.Д., Кружков О.А., Шикунов Н.В. Оценка влияния технологических факторов на кинематические параметры удлиненного поражающего элементакумулятивного заряда // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Труды международной конференции IX Харитоновские тематические научные чтения. 2007. С. 585—590.

References

1. Bender D., Chouk B., Fong R., Ng W., Rice B., Volkmann E. *Explosively Formed Penetrators with Canted Fins*. 19-th International Symposium of Ballistics. Switzerland, 2001, pp. 755—762.

2. Horst G. Bugiel *Insert for a projectile-forming charge*. Patent USA, no. US4590861 A, SShA. 06/606,355. 1986. 5 p.

3. Danielson E. M., Tompkins R. E. *Shoot-through cover for an explosively formed penetrator warhead*. Patent USA, no. US5925845 A; SShA. 08/905,174. 1999. 11 p.

4. Weimann K. *Arrangement for production of explosively formed projectiles*. Patent USA, no. US4982667 A; SShA. 07/268,453, 1991. 6 p.

5. Scholles H., Witt W. *Warhead*. Patent USA, no. US4622901 A; SShA. 06/676,663. 1986. 3 p.

6. Lips H., Peters J. *Inserts for coating an explosive charge, and forming a rod-shaped projectile, and process for manufacture of inserts*. Patent USA, no. US4714019 A; SShA. 06/886,903. 1987. 4 p.

7. Jun W., Jingbo L., Yixin D. Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively-formed projectile. *International Journal of Impact Engineering*. 2007, vol. 34, no. 7, pp. 1147—1162.

8. Babuška I., Suri M. *On locking and robustness in the finite element method*. *SIAM J. Numer. Anal.* 1992, vol. 29, no. 5, pp. 1261—1293.

9. Hallquist J., *LS-Dyna. Keyword user's manual*. Livermore Software Technology Corporation. Available at: <http://www.lstc.com/> (accessed 22 April 2013). 2546 p.

10. Kolpakov V.I., Baskakov V.D., Shikunov N.V. *Matematicheskoe modelirovanie funktsionirovaniia snariadoformiruyushchikh zariadov s uchetom tekhnologicheskikh asimmetrii* [Mathematical modeling of the functioning of snaryadoformiruyuschih charges taking into account technological asymmetries]. *Oboronnaia tekhnika* [Defense Technology]. 2010, no. 1, 2, pp. 82—89.

11. Nandlall D., Wong G. *A Numerical Analysis of the Effect of Erosion Strain on Ballistic Performance Prediction*. 1999. Department of National Defence publ., Canada. 28 p.

12. Kolpakov V.I., Baskakov V.D., Kruzhhkov O.A., Shikunov N.V. *Otsenka vliianiia tekhnologicheskikh faktorov na kinematicheskie parametry udlinennogo porazhaiushchego elementa kumulativnogo zariada* [Assessing the impact of technological factors on the kinematic parameters of the elongated striking element of the shaped charge]. *Ekstremal'nye sostoiianiia veshchestva. Detonatsiia. Udarnye volny. Trudy mezhdunarodnoi konferentsii 9 Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniia* [Extreme states of matter. Detonation. Shock waves. Proceedings of the International Conference 9 Kharitonov thematic scientific reading]. 2007, pp. 585—590.

Статья поступила в редакцию 26.04.2013

Информация об авторах

АСМОЛОВСКИЙ Николай Александрович (Москва) — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: Nikolay.Asmolovskiy@gmail.com).

БАСКАКОВ Владимир Дмитриевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: baskakov_vd@mail.ru).

ТАРАСОВ Владимир Алексеевич (Москва) — доктор технических наук, зав. кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).

Information about the authors

ASMOLOVSKIY Nikolay Aleksandrovich (Moscow) — Post-Graduate of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: Nikolay.Asmolovskiy@gmail.com).

BASKAKOV Vladimir Dmitrievich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: baskakov_vd@mail.ru).

TARASOV Vladimir Alekseevich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Head of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: tarasov_va@mail.ru).