

регистрирующей аппаратуры, осуществляющей регистрацию состояния частиц и фрагментированного поддона на участках, где не допускается использование контактных датчиков.

Полученные экспериментальные результаты подтверждают методику определения средней скорости гиперзвуковых частиц, имитирующих космический мусор, способом измерения времени их пролета через измерительный участок, заданный бесконтактными измерительными сечениями.

Список литературы

1. Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N. Experimental and Numerical Study of Peculiarities at High-Velocity Interaction between a Projectile and Discrete Bumpers // *Int. J. Impact Engn.* 2010, V. 37, P. 980-994.
2. Способ имитации свойств плутония. Патент РФ №2298850, опубл. 10.05.2007.
3. Батьков Ю.В., Борисенок В.А., Бельский В.М., Герасимов С.И. и др. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках: Монография/ под общ. ред. М.В. Жерноклетова. – Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.-403с.
4. Способ запуска регистрирующих систем и измеритель средней скорости метаемого объекта. Патент РФ №2525687, опубл. 23.06.2014.
5. Чечерников В.И. Магнитные измерения. М.: Изд-во МГУ, 1969.
6. Filippov A.V., Rudakova M.A., Skirda V.D. // *Magnetic Resonance in Chemistry.* 2012. V. 50. №2. P. 114.
7. Аэрофизические исследования сверхзвуковых течений. АН СССР, М-Л, Наука, 1967 г., стр. 192-196.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ МЕНИСКОВЫХ ОБЛИЦОВОК НА ФОРМИРОВАНИЕ СКЛАДОК В КОРМОВОЙ ЧАСТИ УДЛИНЕННЫХ УДАРНЫХ ЯДЕР

М.А. Бабурин¹, В.Д. Баскаков¹, С.В. Елисеев², О.В. Зарубина¹, К.А. Карнаухов¹, В.А. Тарасов¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² НИМИ им. В.В. Бахирева, Москва, Россия

В настоящее время снарядоформирующие заряды (СФЗ) нашли широкое применение. Принцип действия таких зарядов основан на схлопывании менисковой облицовки продуктами детонации, в результате чего происходит формирование ударного ядра (УЯ) [1]. Для поражения крупногабаритных объектов на больших расстояниях перспективными считаются удлиненные УЯ ($l/d \geq 2$, где l – длина УЯ, d – диаметр УЯ), с их помощью может быть достигнуто бронепробитие свыше калибра, однако такие элементы плохо стабилизированы на полете в следствии их большой длины, технологических погрешностей и внешних факторов. Для улучшения аэродинамических и баллистических характеристик применяют различные методы, в основном конструктивные, которые связаны с созданием складчатой кормовой части УЯ путем изменения корпуса, облицовки, применением вкладышей и многоточечного инициирования.

Существует ряд работ, которые посвящены исследованию формирования складчатой кормовой части удлиненных УЯ [2-5]. Так основные закономерности формирования прямой складчатой кормовой части УЯ за счет применения многоточечного инициирования установлены в работах [2, 3]. В работе [4] установлено, что для формирования складчатой кормовой части УЯ можно использовать менисковые облицовки, имеющие меридиональные неравномерности волновой формы на внутренней или внешней поверхностях облицовки. Широкий интерес представляет работа, в которой представлены данные по уровню угловой скорости вращения

удлиненных УЯ с наклонным складчатым стабилизатором в кормовой части, которые сформированы с помощью применения вкладышей между зарядом ВВ и облицовкой [5]. Целью настоящей работы является установление закономерностей формирования наклонных складок УЯ из облицовок переменной толщины в окружном направлении и оценка уровня угловой скорости вращения, а также аэродинамических характеристик УЯ.

Закономерности формирования УЯ были установлены с помощью трехмерного численного моделирования в программном комплексе LS-DYNA в системе координат Лагранжа. Основной особенностью моделирования являлось применение в качестве типа конечного элемента 4-х узлового тетраэдра (ELFORM-13) и специальной расчетной сетки для подавления схемных возмущений в кормовой части УЯ [6]. Начальные и граничные условия, модели материалов, уравнения состояния были приняты по рекомендациям работ [2-4, 7].

Для исследования процессов складкообразования применялись лабораторные заряды конструкции НИМИ диаметром $d_3 = 70$ мм с точкой инициирования расположенной на оси, которые отличались между собой геометрией облицовок. Корпуса (плотность $\rho = 7,81$ г/см³, модуль Юнга $E = 210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, динамический предел текучести $Y_T = 250$ МПа) и облицовки ($\rho = 7,85$ г/см³, $Y_T = 650$ МПа, модуль сдвига $G = 80$ ГПа) были выполнены из пластичной стали, в качестве материала ВВ применялся состав ТГ40 ($\rho = 1,67$ г/см³, скорость детонации $D = 7750$ м/с, давление в точке Чепмена-Жуте $P = 29,5$ ГПа).

Облицовка СФЗ №1. Диаметр $d_0 = 64$ мм, радиус кривизны $R_0 = 55$ мм, толщина $\delta = 2,45$ мм, прогиб $\Delta H = 11,5$ мм.

Облицовка СФЗ №2. Диаметр $d_0 = 64$ мм, радиус кривизны $R_0 = 49,8$ мм, толщина $\delta = 2,2$ мм, прогиб $\Delta H = 12,3$ мм.

Облицовка СФЗ №3. Диаметр $d_0 = 64$ мм, радиус кривизны $R_0 = 47,8$ мм, толщина $\delta = 2,2$ мм, прогиб $\Delta H = 10,1$ мм.

На первом этапе численных расчетов проводилось подавление схемного складкообразования за счет изменения структуры расчетной сетки [6], а также подтверждались расчетные значения геометрических и кинематических параметров осесимметричного УЯ, сформированного из СФЗ №1, сравнением с экспериментальными данными.

На втором этапе путем сравнения расчетов с экспериментами подтверждалось формирование прямого складчатого стабилизатора из периферийной части менисковой облицовки СФЗ №2, выполненной понижениями относительной толщины $\overline{\Delta\delta} = 0,14$ ($\overline{\Delta\delta} = \Delta\delta/\delta$, где $\Delta\delta$ – толщина понижений или повышений) в виде круговых сегментов количеством $n = 6$ на внутренней поверхности, повторяющихся в окружном направлении. Круговые сегменты были выполнены радиусом 50 мм, а расстояние между центрами сегментов и центром облицовки составило 72 мм. Форма и габаритные размеры УЯ, полученных численным и экспериментальным путем, удовлетворительно совпали между собой, а разница начальных скоростей УЯ составила 11 % (рисунок 1).

Полученные результаты позволили считать численные расчеты адекватными и использовать численное моделирование для детального анализа процессов формирования прямых и наклонных складок.

Дальнейшие исследования проводились на менисковых облицовках с несимметричным и симметричным повторяющимся контуром в виде треугольных областей в окружном направлении, выполненных на внутренней или внешней поверхности в виде понижений или повышений толщины (рисунок 2).

В результате численных расчетов было установлено, что из менисковых облицовок с несимметричным, повторяющимся в окружном направлении контуром формируются УЯ с наклонной складчатой кормовой частью, а из облицовок с симметрично повторяющимся контуром формируются УЯ с прямой складчатой кормовой частью. Отмечено, что при уменьшении размера D_1 для облицовок с понижениями толщины на внутренней или внешней поверхности растет уровень пластических деформаций сформированного УЯ в головной части, а при уменьшении

размера D_2 для облицовок с повышениями толщины уровень пластических деформаций УЯ в головной части снижается (рисунок 3).

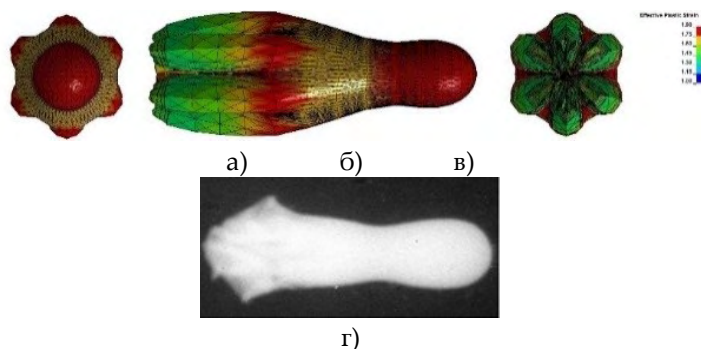


Рисунок 1. УЯ, полученные численным а) – в) и экспериментальным г) путем в момент времени $t = 149$ мкс для СФЗ №2:
а) – вид с носка; б) вид со стороны впадины; в) вид с кормы;
г) рентгенограмма
Расчеты представлены на поле интенсивности пластических деформаций

Также установлено, что имеет место скрутка кормовой части относительно тела УЯ, которая может приводить к разрушению УЯ в осевом направлении (рисунок 3). Результаты расчетов также показали, что из менисковых облицовок с понижениями и повышениями толщины формируются УЯ с кормовой складчатой частью с наклоном в разные стороны и отличной конфигурации (рисунок 3 б, г).

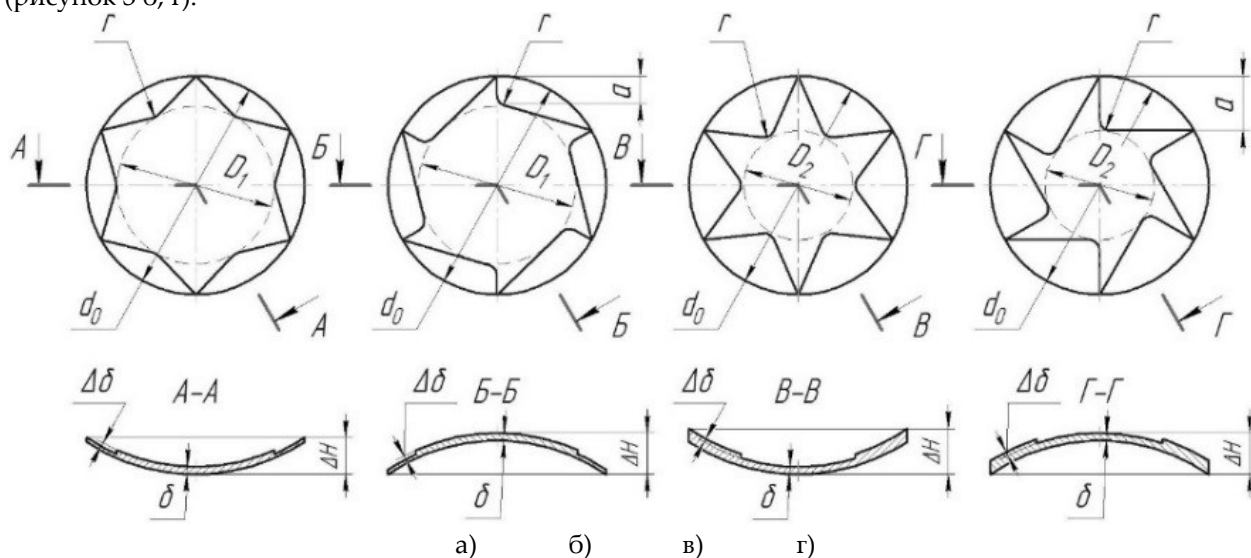


Рисунок 2. Конфигурации облицовок СФЗ №3 диаметром d_0 :
а), б) – $a = d_0/8$, $D_1 = 3d_0/4$; в), г) – $a = d_0/4$, $D_2 = d_0/2$;
а) – понижения толщины на внутренней поверхности;
б) – понижения толщины на внешней поверхности; в) – повышению толщины на внутренней поверхности; г) повышению толщины на внешней поверхности;
 r – радиус скругления кромок

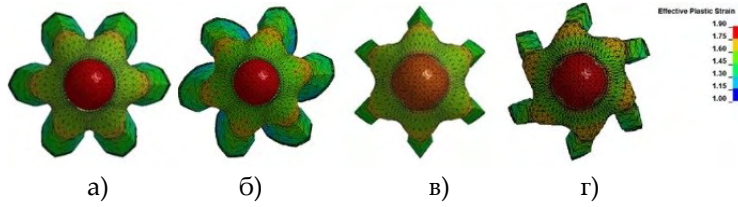


Рисунок 3. Распределение пластической деформации на конфигурации УЯ СФЗ №3 (вид с носка) при изменении толщины $\Delta\delta = 0,05$ на внутренней поверхности облицовки $a = d_0/4$ и $D_2 = d_0/2$ в момент времени $t = 222$ мкс:
а), б) – понижений; в), г) – повышений; а), в) – симметричный контур;
б), г) несимметричный контур

Детально проанализированы контуры ребер и впадин складок УЯ, сформированных из облицовок с понижениями и повышениями толщины на периферии (рисунок 3 б, г). В результате сравнения УЯ между собой выявлено, что наклон складки можно характеризовать двумя углами: углом α наклона складки относительно оси симметрии УЯ и углом β наклона складки к телу УЯ (рисунок 4).

Для оценки влияния выступающей наклонной кормовой части на скорость вращения предложен следующий подход (рисунок 4), который основан на методе Ньютона и применим в рассматриваемых условиях $v(t) \geq 5M$, где M – число Маха. Лопасть складчатой кормовой части для упрощения была представлена треугольной формой. Такой подход позволил получить зависимость давления на поверхность от углов α и β взаимодействия потока с обтекаемой поверхностью:

$$P_0(t) = n\rho_0 v^2(t) \sin^2 \alpha \cos^2 \beta, \quad (1)$$

где n – количество складок; ρ_0 – плотность среды; $v(t)$ – скорость набегающего потока.

Момент сил, действующий на наклонную складчатую кормовую часть, определялся как:

$$M_n(t) = n \int_{l_c}^0 P_0(t) y_1(x_1) \cos \alpha \cos \beta \left(\frac{y_1(x_1)}{2} \cos \beta + \frac{d_2}{2} \right) dx_1 \quad (2)$$

Подставив (1) в (2) и выполняя интегрирование, было получено выражение для оценки скорости вращения УЯ вокруг оси:

$$\omega(t) = \frac{M_n(t)}{J_0} t = n\rho_0 v^2(t) \sin^2 \alpha \cos \alpha \cos^3 \beta \left(\frac{l_c h \left(\frac{h}{3} \cos \beta + \frac{d_2}{2} \right)}{2J_0} \right) t, \quad (3)$$

где J_0 – осевой момент инерции УЯ.

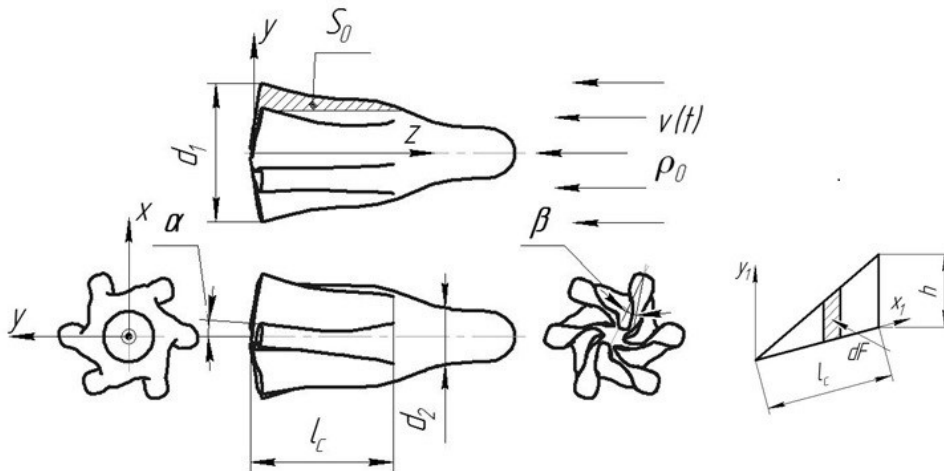


Рисунок 4. Расчетная схема УЯ

d_1 – диаметр кормовой части; d_2 – диаметр головной части; l_c – длина складчатой кормовой части; dF – элементарная сила, действующая на складку; S_0 – площадь, попадающая под набегающий поток; h – высота складки

Анализируя (3) отмечено, что частота вращения ω находится в прямой зависимости по отношению к углу α (угол раскрутки) и обратной – к углу β (паразитный угол).

Произведена приближенная оценка скоростей вращения УЯ по зависимости (3), сформированных из облицовок с повышением и понижением толщины (рисунок 3 б, г). Полученные оценочные значения скорости вращения $\omega \approx 2300$ рад/с (рисунок 3 б) и $\omega \approx 5300$ рад/с (рисунок 3 г) на расстоянии 100 метров не противоречат ранее проведенным исследованиям и позволяют надеяться, что вращение будет являться дополнительным фактором стабилизации УЯ на полете к преграде [1].

Кроме оценки скорости вращения УЯ численно проведен расчет аэродинамических характеристик УЯ, сформированного из облицовки с понижением толщины, в широком диапазоне угла атаки α в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation. Данный комплекс хорошо себя зарекомендовал для оценки аэродинамических характеристик тел для скорости набегающего потока $v(t) \geq 4M$, о чем говорят удовлетворительные совпадения результатов численных расчетов и экспериментов [8].

В результате выполненных расчетов получены аэродинамические характеристики осесимметричного УЯ с номинальной конической юбкой и УЯ с прямой и наклонной складчатой комовой частью (рисунок 3 а, б).

Установлено, что коэффициент осевой силы c_x меньше для УЯ с прямой складчатой кормовой частью по сравнению с УЯ с наклонной складчатой кормовой частью, что объясняется большей интенсивностью сжатия кормы УЯ с прямой складчатой кормовой частью. Коэффициент нормальной силы c_y , коэффициент момента тангажа m_z , координата центра давления CP не отличается между собой для этих УЯ. Так же установлено, что для УЯ со складчатой кормовой частью коэффициент осевой силы c_x в 1,5...2 раза меньше, чем у номинального УЯ с развитой конической кормой, что положительно сказывается на подлетной скорости к объекту разрушения, однако такой элемент менее устойчив на полете без учета вращения (рисунок 5).

Выводы.

1. Из облицовок менисковой формы, в периферийной части которой в окружном направлении чередуются области переменной толщины, выполненные в виде симметричных сегментов, формируются УЯ со складчатой прямой кормовой частью. Для облицовок с областями переменной толщины на периферии, выполненными в виде несимметричных сегментов, формируются УЯ со складчатой наклонной кормовой частью.

2. Экспериментально подтверждено формирование складчатой кормовой части УЯ при использовании облицовок менисковой формы с переменной толщиной в окружном направлении.

3. Скрутка головной части относительно кормовой может приводить к разрушению УЯ в осевом направлении.

4. Предложен алгоритм определения углов наклона складчатой кормовой части УЯ.

5. Установлено, что при использовании облицовок переменной толщиной в окружном направлении частота вращения УЯ может достигать значений $\omega \approx 2300 \dots 5300$ рад/с на расстоянии 100 метров.

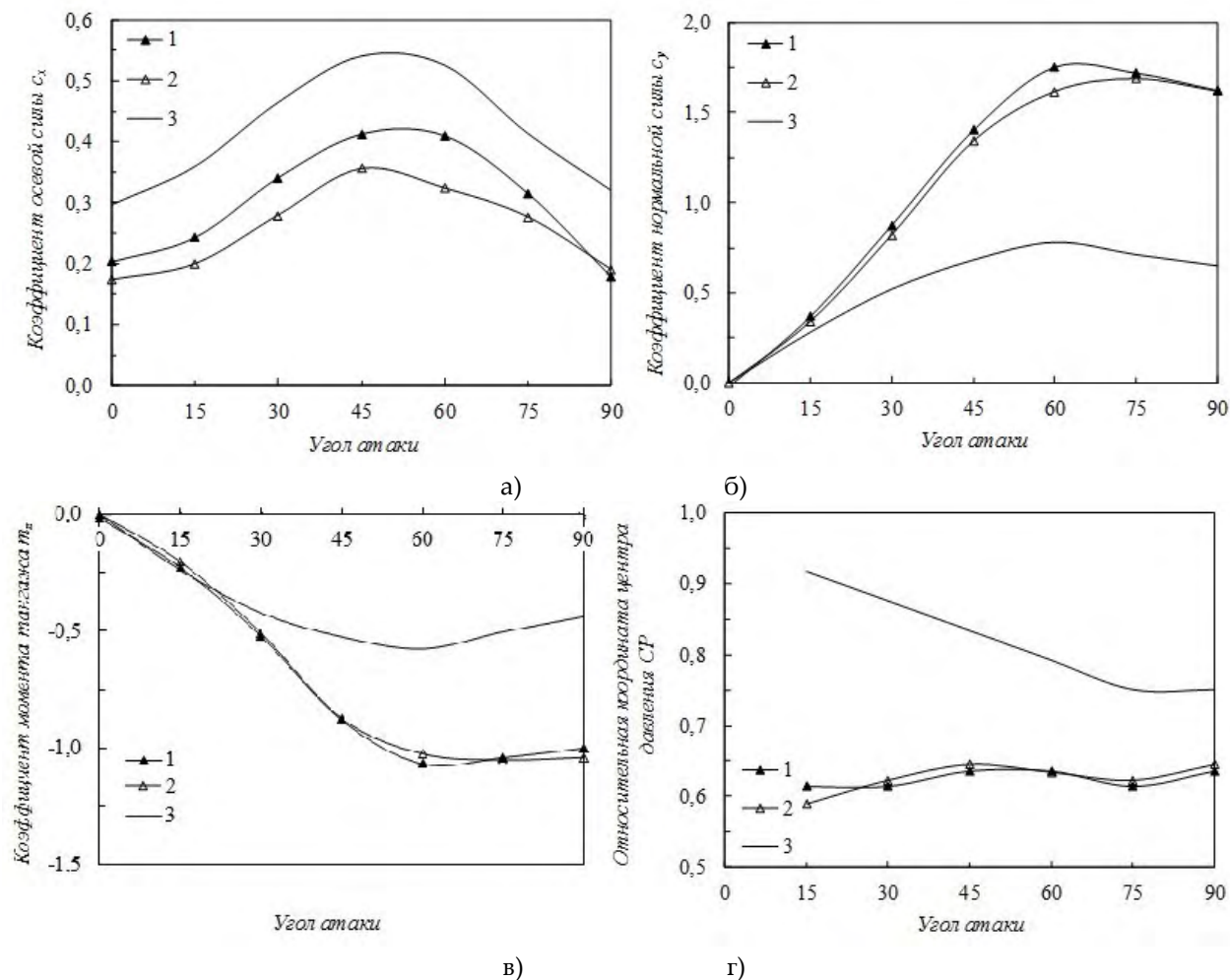


Рисунок 5. Графики зависимостей аэродинамических характеристик от угла атаки УЯ: а) коэффициента осевой силы C_x ; б) коэффициента нормальной силы C_y ; в) коэффициента момента тангажа m_z ; г) относительной координаты центра давления CP 1 – УЯ с наклонной складчатой кормовой частью (рисунок 3 б); 2 – УЯ с прямой складчатой кормовой частью (рисунок 3 а); 3 – номинальный осесимметричный УЯ с конической кормовой частью

Список литературы

1. Селиванов В.В., ред. Боеприпасы. В 2 т. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, т. 1, 506 с.
2. Liu J., Gu W., Lu M., Xu H., Wu S. Formation of explosively formed penetrator with fins and its flight characteristics. *Defense Technology*, 2014, no. 10, pp. 119–123. DOI: 10.1016/j.dt.2014.05.00Mr.
3. Li R., Li W.B., Wang X.M., Li W.B. Effects of control parameters of three-point initiations on the formation of an explosively formed projectile with fins. *Shock Waves*, 2018, vol. 28, iss. 2, pp.191-204.
4. Н.А. Асмоловский, В.Д. Баскаков, В.А. Тарасов Анализ влияния периодических возмущений на формирование высокоскоростных стержневых элементов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2013. №8. С. 8-14.
5. D. Bender, B. Chouk, R. Fong, W. Ng, B. Rice, E. Volkmann Explosively Formed Penetrators (EFP) with Canted Fins. 19th International Symposium on Ballistics (Interlaken, Switzerland, 7–11 May, 2001). Proceedings. In 3 volumes. 2001, vol. 2, pp. 755–762.
6. Johnson G.R., Stryk R.A. Some considerations for 3D EFP. *Int. J. Impact Eng.* 2006. Vol. 32, Iss.10, pp. 1621–1634.

7. В.Д. Баскаков, О.В. Зарубина, К.А. Карнаухов, В.А. Тарасов. Математическое моделирование процесса соударения плоских струй идеальной жидкости Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2016. № 2 (65). С. 79-90.
8. Н.А. Асмоловский, В.Д. Баскаков, В.А. Тарасов Численно-аналитическая оценка аэродинамических коэффициентов удлиненных тел сложной формы методом Ньютона. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2014. № 4. С. 109-122.

ANALYZING THE INFLUENCE OF THE THICKNESS VARIATION OF MENISCUS LINERS ON FORMING WRINKLES IN THE AFTERBODY OF EXTENDED EXPLOSIVELY FORMED PENETRATORS

M.A. Baburin¹, V. D. Baskakov¹, S.V. Yeliseev², O.V. Zarubina¹, K.A. Karnaukhov¹, V.A. Tarasov¹

¹BMSTU named after N.E. Bauman, Moscow, Russia

²NIMI named after V.V. Bahirev, Moscow, Russia

Explosively formed projectiles are widely used nowadays. The working principle of such charges is based on the collapse of the meniscus liner by detonation products, which results in the formation of an explosively formed penetrator (EFP) [1]. Hitting large objects from a big distance is better achieved by using more promising extended EFP-s ($l/d \geq 2$, where l – EFP length, d – EFP diameter); they can help penetrate the armor over caliber; such elements, however, are poorly regulated while in flight because of their length, technological inaccuracies and external factors. In order to improve aerodynamic and ballistic characteristics, various methods are applied, most of them are constructive and connected with creating a folded EFP afterbody by altering the body, liner, applying pillows, and multipoint initiation.

There is a whole range of papers dedicated to studying the formation of the folded afterbody of the extended EFP-s [2-5]. Thus, the main rules of forming a linear folded EFP afterbody by using multipoint initiation are described in the papers [2, 3]. Paper [4] shows that to form a folded EFP afterbody one can use meniscus liners which have wave-shaped meridian irregularities on the inner or the outer surfaces of the liner. Of much interest is the paper which shows the data on the the angular rotation velocity rate of the extended EFP-s with a diagonal folded stabilizing fin in the afterbody, which were formed by applying pillows between the HE of the charge and its liner [5]. The aim of this work is to establish the patterns of formation of the diagonal wrinkles in the EFP from the liners of variable thickness in circumferential direction and to assess the angular rotation velocity rate, as well as the aerodynamic characteristics of the EFP.

The patterns of formation of the EFP were established using 3D numerical modeling in the program complex LS-DYNA in Lagrangian coordinates. The key modeling feature was using a 4-nodular tetrahedron (ELFORM-13) as the type of the finite element, as well as using a special computational grid in order to suppress circuit perturbations in the EFP afterbody [6]. Initial and end conditions, material models, state equations were selected according to the recommendations from works [2-4, 7].

To study the wrinkle formation processes lab charges constructed by NIMI were used; they were 70 mm in diameter ($d_3 = 70$ mm) with the initiation point on the axis and differed in their liner geometry. The bodies (density, $\rho = 7,81$ g/cm³, Young's modulus of elasticity, $E = 210$ GPa, Poisson's ratio, $\mu = 0,3$, dynamic yield limit, $Y_T = 250$ MPa) and liners ($\rho = 7,85$ g/cm³, $Y_T = 650$ MPa, shear modulus, $G = 80$ GPa) were made of ductile steel; as the material for the HE, TG40 composition was chosen

($\rho = 1,67$ g/cm³, detonation velocity, $D = 7750$ m/s, pressure in the Chapman-Jouguet point, $P = 29,5$ GPa).