

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОГИБА  
МЕНИСКОВЫХ ОБЛИЦОВОК  
С ПРОФИЛЕМ ПОСТОЯННОЙ КРИВИЗНЫ  
И ТОЛЩИНЫ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ  
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**М.А. Бабури<sup>1</sup>**

**В.Д. Баскаков<sup>1</sup>**

**С.В. Елисеев<sup>2</sup>**

**Д.А. Иванов<sup>1</sup>**

spaceivanoff@yandex.ru

**К.А. Карнаухов<sup>1</sup>**

**В.А. Тарасов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «НИМИ им. В.В. Бахирева», Москва, Российская Федерация

---

**Аннотация**

Рассмотрена схема лабораторного снарядоформирующего заряда, моделируемая в расчетных пакетах динамического анализа. Сгруппированы конфигурации облицовок в табличной форме с указанием прогибов, начальной толщины и радиуса. Приведены принимаемая в программном комплексе основная система уравнений, описывающая течение материалов в процессе формообразования, и расчетные параметры, определяющие характеристики материалов и дискретность расчетной области. Рассмотрены процессы взрывного формирования высокоскоростных элементов из стальных облицовок снарядоформирующих зарядов, выполненных в широком диапазоне изменений радиуса кривизны, толщины и прогиба. Приведены результаты численного расчета в различные моменты времени процесса взрывного формирования высокоскоростного элемента. Результаты сгруппированы по характеру формообразования и толщине анализируемых облицовок. Установлены основные закономерности влияния конструктивных параметров облицовок на параметры сформированных высокоскоростных элементов. Определены области формирования высокоскоростных элементов, подверженных разрушению в осевом направлении, а также области, определяющие конфигурации целостных компакт-

**Ключевые слова**

*Высокоскоростной элемент, снарядоформирующий заряд, менисковая облицовка, профиль постоянной кривизны и толщины, прогиб*

ных и удлиненных элементов. Выполнено сравнение данных, полученных в результате численных расчетов и натурных экспериментов с высокоскоростными элементами. Выявлено, что различия в геометрических параметрах высокоскоростных элементов составляют не более 6,5 %, а разность осевых скоростей не выходит за пределы 7,5 %. Работа предназначена для специалистов в области быстропротекающих процессов

Поступила 11.12.2023

Принята 14.02.2024

© Автор(ы), 2024

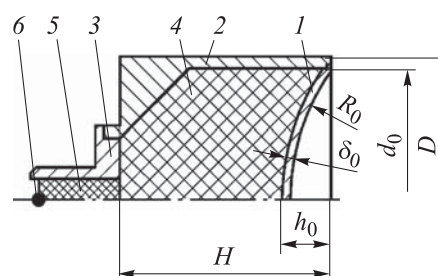
**Введение.** В настоящее время одним из направлений физики быстропротекающих процессов, которому уделяется значительное внимание зарубежных и отечественных исследователей, является изучение принципов действия снарядоформирующих зарядов (СФЗ) различной компоновки. Такие СФЗ используются в продукции двойного назначения. В результате действия СФЗ из менисковых облицовок различной конфигурации формируются компактные или удлиненные высокоскоростные элементы. Проводятся всесторонние исследования процесса формирования высокоскоростных элементов, их полета по траектории длиной примерно 10–2000 калибров заряда и процесса проникания в преграду [1–9].

Первостепенным в изучении принципов действия высокоскоростных элементов является процесс его формирования. *Цель настоящей работы* — выявить основные тенденции процесса формирования высокоскоростных элементов, установить факторы влияния на процесс полета и проникание в преграду, а также определить целесообразность применения технического решения в окончательной конструкции изделия.

**Численная постановка задачи.** Объектом исследования являлся лабораторный СФЗ, схема которого приведена на рис. 1. Численные расчеты проводились в программном комплексе Ansys Autodyn.

**Рис. 1.** Схема лабораторного СФЗ:

1 — менисковая облицовка с профилем постоянной кривизны; 2 — корпус;  
3 — крышка; 4 — заряд ВВ; 5 — шашка бризантного ВВ; 6 — точка детонации;  
 $h_0$ ,  $d_0$  — высота и диаметр облицовки;  
 $H$ ,  $D$  — высота и диаметр корпуса



В качестве взрывчатого вещества (ВВ) использован типовой состав. Облицовка выполнена из пластичной стали, корпусные детали СФЗ — из углеродистой конструкционной стали [10, 11]. Точка инициирования

детонации находилась на оси СФЗ в его донной части. Масса ВВ во всех рассматриваемых конструкциях постоянная.

Расчеты проводились для разных геометрических конфигураций менисковых облицовок с профилем постоянной кривизны и толщины. Прогибы  $f_0 = h_0/d_0$  рассматриваемых менисковых облицовок, в зависимости от толщины  $\delta_0$  и радиуса кривизны  $R_0$ , приведены в табл. 1.

Таблица 1

Прогибы  $f_0$  рассматриваемых менисковых облицовок

Толщина $\delta_0$ облицовки, мм	Радиус кривизны $R_0$ облицовки, мм										
	0	35	40	45	50	55	60	65	70	75	250
2,2	0,033	0,387	0,297	0,252	0,222	0,200	0,183	0,170	0,159	0,149	0,067
2,4	0,036	0,390	0,300	0,255	0,225	0,203	0,186	0,173	0,162	0,152	0,070
2,6	0,039	0,393	0,303	0,258	0,228	0,206	0,189	0,176	0,165	0,155	0,072
2,8	0,042	0,396	0,306	0,261	0,231	0,209	0,192	0,179	0,168	0,158	0,076
3,0	0,045	0,399	0,309	0,264	0,234	0,212	0,197	0,182	0,171	0,161	0,079

Для описания поведения взаимодействующих материалов в программном комплексе Ansys Autodyn принята система уравнений двумерного осесимметричного течения в переменных Эйлера классического вида [12, 13]:

$$\rho \frac{\delta v_i}{\delta t} + \nabla_j (\rho v^j v_i) = \nabla_j \sigma^{ij} + F_i;$$

$$\frac{\delta p}{\delta t} + \nabla_i (\rho v^i) = 0;$$

$$\rho \frac{\delta e}{\delta t} + \nabla_i (e v^i) = \frac{\sigma_{ij}}{\nabla v_i},$$

где  $\rho$  — плотность материала;  $v_i$  — компоненты вектора скорости;  $t$  — время;  $\nabla$  — оператор набла;  $\sigma_{ij} = D_{\sigma ij} - (p + q)\delta_{ij}$  — компоненты тензора напряжений Коши ( $D_{\sigma ij}$  — компоненты девиатора тензора напряжений;  $p$  и  $q$  — текущее давление и добавка к давлению, обусловленная искусственной вязкостью (гидростатическая и девиаторная составляющие тензора напряжений);  $\delta_{ij}$  — дельта-функция Кронекера);  $F_i$  — компоненты вектора объемной силы, действующей на тело;  $e$  — удельная внутренняя энергия;  $i, j = x, y, \theta$  ( $\theta$  — направление, перпендикулярное плоскости  $XOY$ , с помощью которого учитывалась осесимметричная постановка).

Связь между компонентами дивергента тензора напряжений и скоростью деформаций описывается физическим соотношением (уравнением пластического течения Прандтля — Рейса):

$$\frac{dD_{\sigma ij}}{dt} + 2\lambda GD_{\sigma ij} = 2G \left( \dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{1}{3\rho} \frac{dp}{dt} \delta_{ij} \right),$$

где  $\lambda = \frac{3}{2\sigma T^2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^p$  — коэффициент пропорциональности в ассоциированном законе пластического течения ( $\sigma$  — динамический предел текучести материала;  $\varepsilon_{ij}^p = \varepsilon_{ij} + \Delta\varepsilon_{ij}$  — остаточная деформация);  $G$  — модуль сдвига;  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  — компоненты тензора скоростей деформаций.

Краевыми условиями для данной численной задачи являлись: условия симметрии на оси  $x$  ( $V_y = 0, y = 0$ ), задание параметров Чепмена — Жуге на фронте детонационной волны, на контактных границах (типа корпус–параметры детонационной волны (корпус–воздух) — нормальных составляющих напряжения в текущем элементе оболочки  $\sigma_n = p'$ , где  $p'$  — давление в продуктах детонации или воздухе). В начальный момент времени все рассматриваемые среды находятся в покое ( $v_i = 0$ ), а состояние материалов составных частей соответствует невозмущенной среде ( $p_i = p_{i0}$ ).

Размер расчетной ячейки составлял 0,25 мм. Рассматривалась склеенная расчетная область, состоящая из двух областей; первая предназначалась для описания процесса детонации и метания менисковой облицовки, вторая — для процесса формирования высокоскоростного элемента.

Динамический предел текучести менисковой облицовки  $\sigma = 550$  МПа, что не противоречит рекомендациям работ [14–20]. Для стальной менисковой облицовки также применялась гидродинамическая модель материала и уравнение состояния Ми — Грюнайзена, описывающее связь между давлением и объемом тела при заданной температуре, со следующими исходными параметрами: начальная плотность  $\rho_0 = 7,85$  г/см<sup>3</sup>, модуль сдвига  $G = 80$  ГПа. Для стального корпуса принималась упругопластическая модель материала со следующими начальными параметрами: начальная плотность  $\rho_0 = 7,83$  г/см<sup>3</sup>, модуль Юнга  $E = 210$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,26$ , динамический предел текучести  $\sigma = 792$  МПа. Для ВВ использовалось уравнение состояния продуктов взрыва Джонса — Уилкинса — Ли со следующими исходными параметрами: начальная плотность  $\rho_0 = 1,67$  г/см<sup>3</sup>, скорость детонации  $D = 7980$  м/с и давление в точке Чепмена — Жуге  $P = 29,5$  ГПа [15–17].

Запишем уравнение состояния Джонса — Уилкинса — Ли в классическом виде:

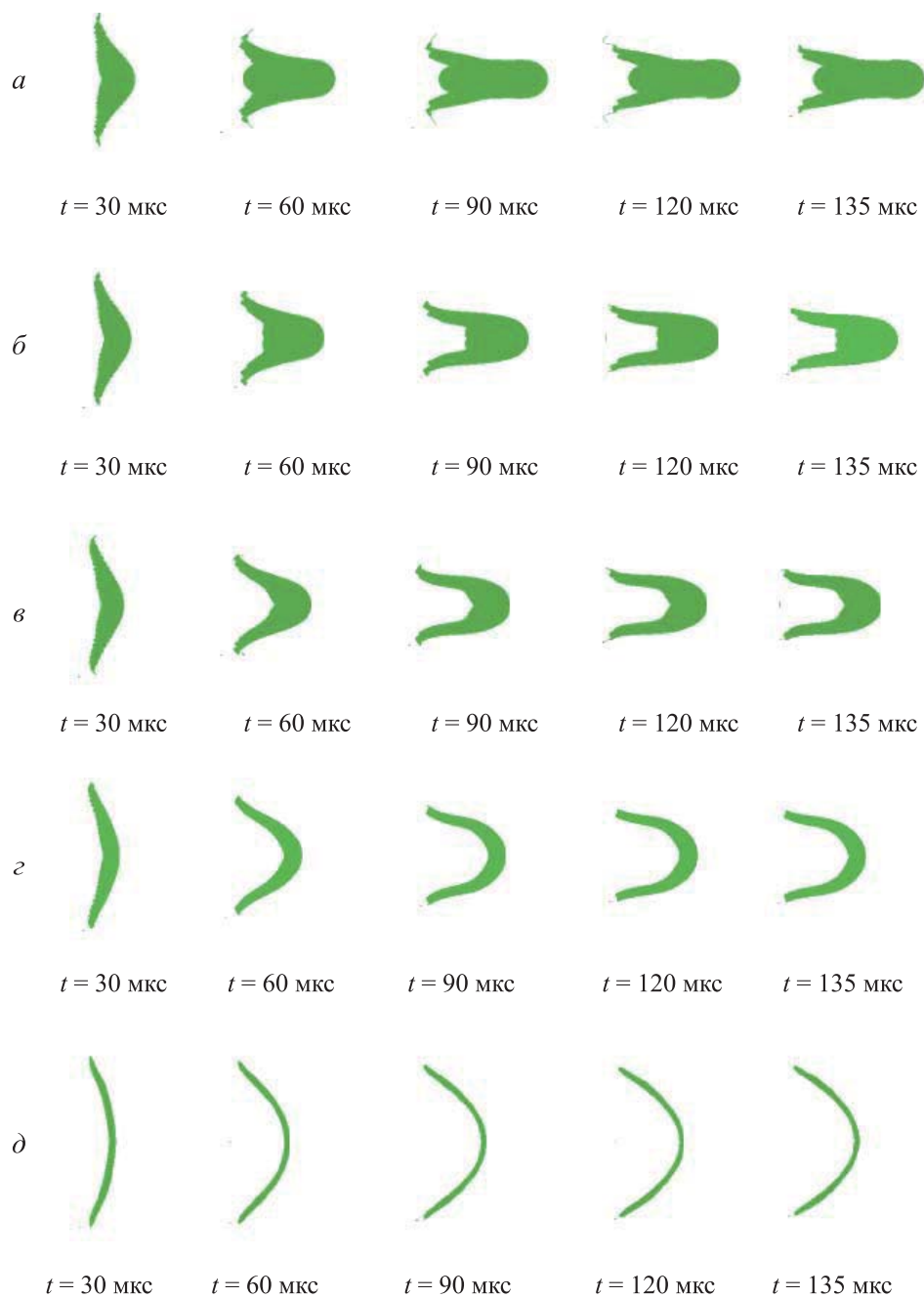
$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega \epsilon \rho_0}{V},$$

где  $V$  — относительный удельный объем;  $A$ ,  $B$ ,  $\omega$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  — параметры модели.

**Обсуждение результатов.** Конфигурации и характеры разрушения высокоскоростных элементов, полученные в результате численных расчетов в разные моменты процесса формирования, приведены на рис. 2, 3.

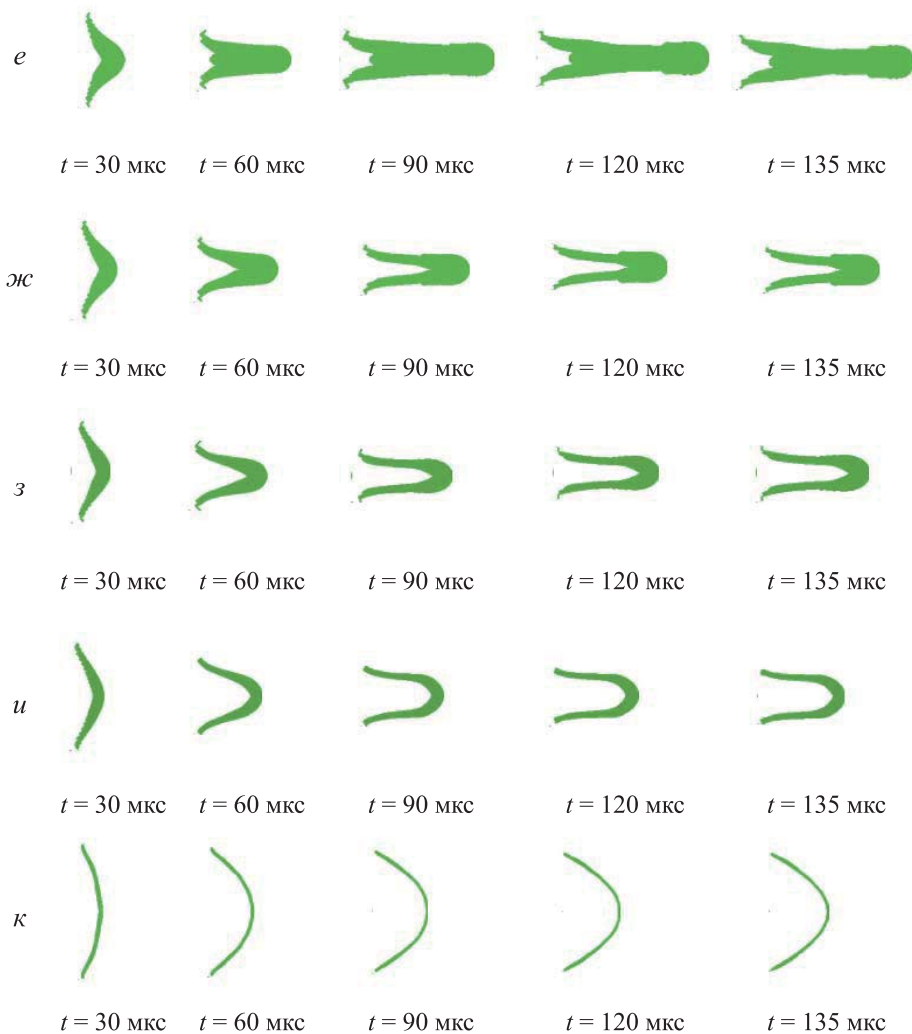
Всесторонний анализ конфигураций полученных высокоскоростных элементов позволил установить, что длина  $l$  элемента увеличивается, а диаметр  $d$  кормовой части уменьшается с уменьшением толщины и радиуса кривизны менисковой облицовки (см. рис. 2), т. е. увеличивается удлинение  $\Delta = l/d$  высокоскоростного элемента. Наполненность элемента (отношение фактического объема элемента к объему фигуры, полученной в результате вращения внешней поверхности элемента относительно осевой линии) увеличивается с увеличением прогиба  $f_0$  облицовки. Такая тенденция будет положительно сказываться на пробивной способности при прочих равных условиях [21, 22]. Значительное уменьшение радиуса кривизны приводит к увеличению наполненности элемента и к разрушению в осевом направлении (см. рис. 3). Следует также принять во внимание, что скорость высокоскоростного элемента уменьшается с увеличением толщины менисковой облицовки, что негативно сказывается на пробивной способности. Кроме того, немаловажным фактором является масса высокоскоростного элемента, которая увеличивается при увеличении толщины и уменьшении радиуса кривизны облицовки. Для определения степени влияния удлинения, наполненности, осевой скорости и массы высокоскоростного элемента на пробивную способность необходимо провести дополнительные исследования чувствительности перечисленных факторов.

По результатам численных расчетов построены зависимости осевой скорости высокоскоростных элементов (см. рис. 2) от прогиба  $V_0 = V_0(f_0)$  в момент времени  $t = 135$  мкс (рис. 4). Для объектов исследования, которые были подвержены в процессе формирования разрушению в осевом направлении (см. рис. 3), осевая скорость высокоскоростного элемента принималась равной скорости его головной части.



**Рис. 2 (начало).** Конфигурации высокоскоростных элементов в различные моменты времени:

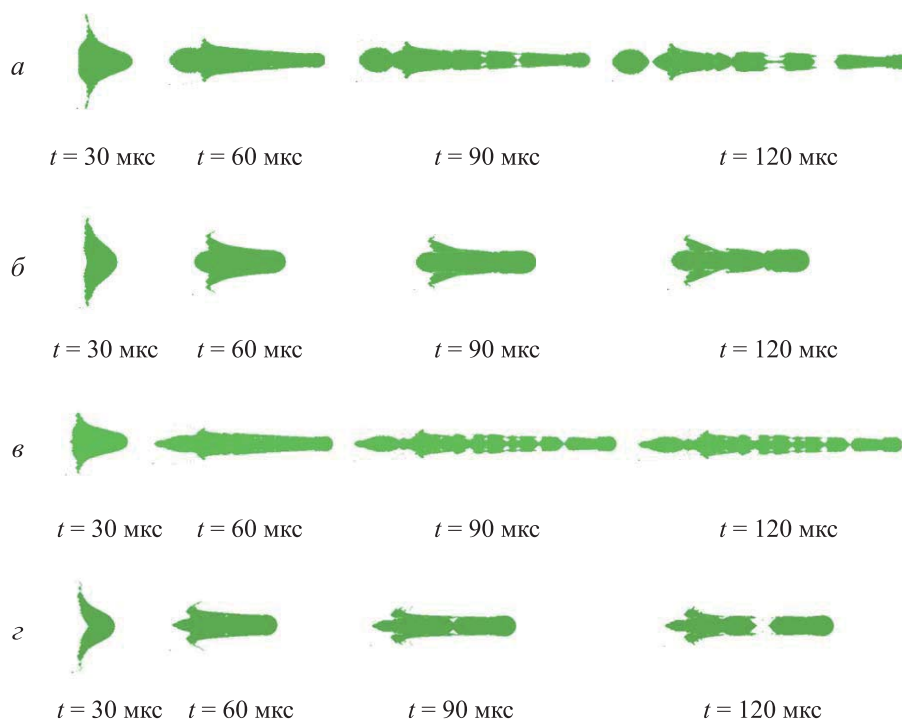
$a-d$  —  $\delta_0 = 3 \text{ мм}$ ,  $f_0 = 0,234, 0,212, 0,197, 0,161, 0,079$  соответственно



**Рис. 2 (окончание).** Конфигурации высокоскоростных элементов в различные моменты времени:

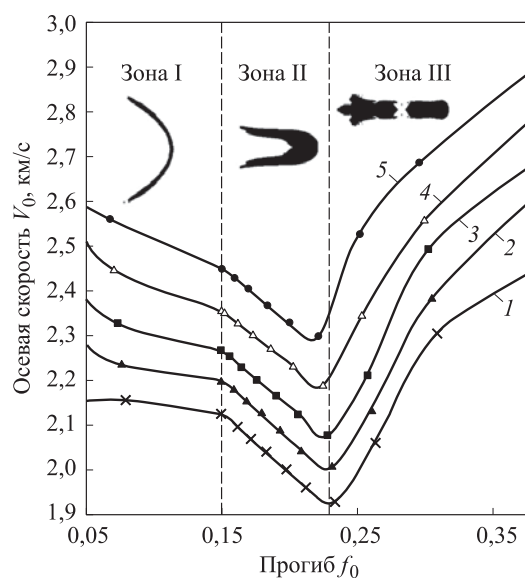
$e-k - \delta_0 = 2,2 \text{ мм}, f_0 = 0,222, 0,2, 0,183, 0,159, 0,067$  соответственно

На рис. 4 можно условно выделить три зоны. Зона I — область формирования высокоскоростных элементов с удлинением  $\Delta \leq 1$ . Такие элементы не относятся к удлинённым. С увеличением прогиба менисковой облицовки скорость элемента в осевом направлении уменьшается, периферийная зона менисковой облицовки при выворачивании и схлопывании стремится к оси элемента. Зона II — область формирования цельных удлинённых высокоскоростных элементов с удлинением  $\Delta > 1$ . С увеличением прогиба менисковой облицовки скорость удлинённого высокоскоростного элемента уменьшается при увеличении удлинения  $\Delta$  элемента



**Рис. 3.** Характеры разрушения высокоскоростных элементов в различные моменты времени:

*a, б* —  $\delta_0 = 3$  мм,  $f_0 = 0,4, 0,262$ ; *в, г* —  $\delta_0 = 2,2$  мм,  $f_0 = 0,387, 0,252$



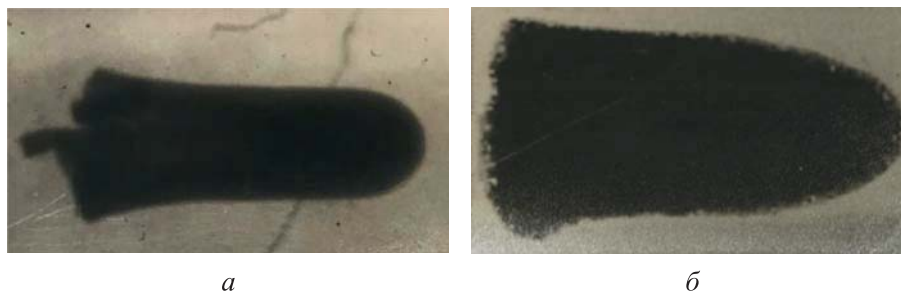
**Рис. 4.** Зависимости осевой скорости  $V_0$  элементов от прогиба  $f_0$  менисковых облицовок в момент времени  $t = 135$  мкс:

кривые 1–5 —  $\delta_0 = 3, 2,8, 2,6, 2,4, 2,2$  мм соответственно



на максимальное значение  $\Delta_{\max}$ , при котором происходит разрушение в осевом направлении. При этом в области границы зоны II ( $f_0 = 0,23$ ) зафиксирована наибольшая наполненность элементов. Зона III — область, в которой высокоскоростные элементы подвержены разрушению в осевом направлении. При увеличении прогиба скорость головной части высокоскоростного элемента увеличивается, а момент разрушения в осевом направлении наступает раньше, чем у элемента, сформированного из менисковой облицовки с меньшим прогибом.

Адекватность результатов численных расчетов, приведенных на рис. 4, подтверждается результатами натуральных испытаний — рентгенограммами высокоскоростных элементов, сформированных из менисковых облицовок (рис. 5). Так, осевые скорости высокоскоростных элементов, полученных численным способом, всего на 7,5 % превышают скорости высокоскоростных элементов, полученных в результате натурального эксперимента. При этом разность значений удлинения  $\Delta$  высокоскоростных элементов, полученных в результате расчета и натурального эксперимента, составляет не более 6,5 %. Абсолютные значения осевых скоростей и удлинений высокоскоростных элементов, полученные в ходе натурального эксперимента, и их соответствие численным результатам приведены в табл. 2.



**Рис. 5.** Рентгенограммы высокоскоростных элементов, сформированных из менисковых облицовок:  
*a* —  $f_0 = 0,192$ ,  $\delta_0 = 2,2$  мм,  $R_0 = 54$  мм; *б* —  $f_0 = 0,177$ ,  $\delta_0 = 2,45$  мм,  $R_0 = 58$  мм

Таблица 2

**Абсолютные значения осевых скоростей  
и удлинений высокоскоростных элементов**

Практический метод исследования	$f_0$	$\delta_0$	$R_0$	$V_0$	$\Delta$
Численный расчет	0,192	2,2	54	2365	2,6
Натурный эксперимент (рис. 5, <i>a</i> )				2200	2,45
Численный расчет	0,177	2,45	58	2210	1,78
Натурный эксперимент (рис. 5, <i>б</i> )				2060	1,77

**Заключение.** В результате всестороннего исследования процесса формирования высокоскоростных элементов из менисковых облицовок с профилем постоянной кривизны и толщины выявлено, что:

– с уменьшением толщины и радиуса кривизны менисковой облицовки длина высокоскоростного элемента увеличивается, а диаметр корневой части уменьшается, тем самым увеличивается удлинение элемента;

– наполненность высокоскоростного элемента (отношение фактического объема элемента к объему фигуры, полученной в результате вращения внешней поверхности элемента относительно осевой линии) увеличивается при увеличении прогиба менисковой облицовки;

– существует диапазон значений прогиба  $f_0 = 0,15-0,23$ , при котором формируется цельный стальной удлиненный высокоскоростной элемент. При этом увеличение значения прогиба приводит к росту осевой скорости и степени наполненности элемента, а также к разрушению элемента в осевом направлении. Уменьшение прогиба приводит к формированию компактного высокоскоростного элемента с низкой степенью наполненности;

– результаты численных расчетов адекватно описывают процесс формирования высокоскоростных элементов, что подтверждается приведенными результатами натурных экспериментов.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Xing B., Guo R., Hou Y., et al. The mass distribution of behind-armor debris generated during the normal penetration of variable cross-section explosive formed projectile on rolled homogeneous armor steel. *Int. J. Impact Eng.*, 2019, vol. 129, pp. 12–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.02.008>

[2] Wen K., Chen X.-W., Lu Y.-G. Research and development on hypervelocity impact protection using Whipple shield: an overview. *Def. Technol.*, 2020, vol. 17, no. 6, pp. 1864–1886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.11.005>

[3] Wang X., Jiang J., Sun S., et al. Investigation on the spatial distribution characteristics of behind-armor debris formed by the perforation of EFP through steel target. *Def. Technol.*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 119–135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.05.016>

[4] He Q.-G., Chen J.-F., Chen X. Velocity-space analysis method for hazardous fragments in debris clouds. *Int. J. Impact Eng.*, 2022, vol. 161, art. 104087. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104087>

[5] Huang X., Li W., Li W., et al. Energy spatial distribution of behind-armor debris generated by penetration of explosively formed projectiles with different length–diameter ratio. *Appl. Sc.*, 2023, vol. 13, no. 4, art. 2665. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13042665>

- [6] Li D., Jiang J., Men J., et al. Numerical simulation of the fracture characteristics of copper EFP with different constitutive models. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1813, art. 012012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1813/1/012012>
- [7] Spear D.G., Palazotto A.N., Kemnitz R.A. Modeling and simulation techniques used in high strain rate projectile impact. *Mathematics*, 2021, vol. 9, no. 3, art. 274. DOI: <https://doi.org/10.3390/math9030274>
- [8] Баскаков В.Д., Тарасов В.А., Колпаков В.И. и др. Методика оценки влияния погрешностей конструкции снарядоформирующих зарядов на кучность попадания в цель и пробивное действие удлиненных поражающих элементов. *Оборонная техника*, 2010, № 1-2, с. 90–97.
- [9] Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В. Анализ влияния технологических погрешностей менисковых облицовок на динамику взрывного формирования высокоскоростных стержневых элементов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 5 (104), с. 72–86. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2015-5-72-86>
- [10] Xing B.Y., Hou Y.H., Li T.H., et al. Analysis of kinetic energy of behind-armor debris generated during the normal penetration of EFP into armor steel. *Acta Armamentarii*, 2019, vol. 40, no. 10, pp. 2014–2021. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2019.10.006>
- [11] Fedorov S.V., Ladov S.V., Nikol'skaya Y.M., et al. Formation of a high-velocity particle flow from shaped charges with a liner consisting of a hemisphere and a degressive-thickness cylinder. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 479–482. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508217040128>
- [12] Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. Т. 1. М., ФИЗМАТЛИТ, 2004.
- [13] Колпаков В.И. Анализ конструктивных особенностей зарядов с низкими сегментными кумулятивными облицовками из танталовых сплавов. *Тр. Междунар. конф. «XII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны»*. Саров, РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2015, с. 288–290.
- [14] Wang F., Wenyu N., Wang Z. Study on the forming performance of central perforated EFP warhead. *31st Int. Symposium on Ballistics*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.12783/ballistics2019/33201>
- [15] Liu J.F., Long Y., Ji C., et al. Numerical and experimental study on the formation and dispersion patterns of multiple explosively formed penetrators. *Lat. Am. J. Solids Struct.*, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 685–699. DOI: <https://doi.org/10.1590/1679-78253385>
- [16] Бабурин М.А., Елисеев С.В., Карнаухов К.А. и др. Обоснование целесообразной формы кормовой части удлиненных элементов. *Известия РАН*, 2020, № 1, с. 94–99. EDN: KDHMRK
- [17] Cengel Y.A., Cimbala J.M. Fluid mechanics. Fundamentals and applications. New York, McGraw-Hill, 2013.

- [18] Baburin M.A., Baskakov V.D., Eliseev S.V., et al. Influence of geometric features of the peripheral part of the thin-walled spherical segment on the explosive throwing process. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 2 (131), с. 76–87. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2020-2-76-87>
- [19] Круглов П.В., Колпаков В.И. Закономерности взрывного формирования удлиненных высокоскоростных элементов из стальных сегментных облицовок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 12. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>
- [20] Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Боярская Р.В. и др. Математическое моделирование процесса взрывного нагружения менисковой облицовки. *Математическое моделирование и численные методы*, 2016, № 9, с. 52–67. EDN: WEAZAD
- [21] Huang X., Li W., Li W., et al. Energy spatial distribution of behind-armor debris generated by penetration of explosively formed projectiles with different length–diameter ratio. *Appl. Sc.*, 2023, vol. 13, no. 4, art. 2665. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13042665>
- [22] Gustafsson A. Shaped charge design. Karlstad, Karlstad University, 2021.

**Бабурин Михаил Аронович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Баскаков Владимир Дмитриевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Елисеев Сергей Валерьевич** — канд. техн. наук, начальник лаборатории стендовых испытаний АО «НИМИ им. В.В. Бахирева» (Российская Федерация, 125212, Москва, Ленинградское ш., д. 58).

**Иванов Дмитрий Александрович** — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Карнаухов Кирилл Андреевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Тарасов Владимир Алексеевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Елисеев С.В. и др. Численное моделирование влияния прогиба менисковых облицовок с профилем постоянной кривизны и толщины на процесс формирования высокоскоростных элементов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 2 (149), с. 158–173. EDN: TQMPER

---

**NUMERICAL SIMULATION OF THE DEFLECTION EFFECT  
OF MENISCUS LININGS WITH THE CONSTANT CURVATURE  
AND THICKNESS PROFILE ON FORMATION  
OF THE HIGH-SPEED ELEMENTS**

**M.A. Baburin<sup>1</sup>**

**V.D. Baskakov<sup>1</sup>**

**S.V. Eliseev<sup>2</sup>**

**D.A. Ivanov<sup>1</sup>**

spaceivanoff@yandex.ru

**K.A. Karnaukhov<sup>1</sup>**

**V.A. Tarasov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> NIMI, Moscow, Russian Federation

---

**Abstract**

The paper considers the scheme of a laboratory projectile-forming charge simulated in dynamic analysis of the computation packages. It groups the lining configurations in the tabular form indicating deflections, initial curvature thickness and radius. The main equations system adopted in the software package is presented describing the materials flow in shaping, as well as the design parameters that determine characteristics of the materials and discreteness of the computational domain. Processes of explosive formation of the high-speed elements from steel linings of the projectile-forming charges made in a wide range of alterations in the curvature radius, thickness and deflection are considered. Results of numerical calculations are shown at various points in time during formation of the high-speed elements. Results are grouped according to the nature of the analyzed linings formation and thickness. Main patterns of the lining design parameters influence on the formed high-speed element parameters are established. High-speed elements formation areas are identified. They determine configuration of the integral compact and elongated elements, as well as areas of the high-speed elements formation subject to destruction in the axial direction. Data obtained as a result of numerical calculations is compared with data obtained in the full-scale experiments carried out with the high-speed elements. It is shown that the difference in the elements geometric parameters is no more than 6.5 %, and the difference in the axial velocities is no more than 7.5 %. The work is intended for specialists working in the fast processes area

**Keywords**

*High-velocity element, projectile-forming charge, meniscus lining, constant curvature and thickness profile, deflection*

Received 11.12.2023

Accepted 14.02.2024

© Author(s), 2024

## REFERENCES

- [1] Xing B., Guo R., Hou Y., et al. The mass distribution of behind-armor debris generated during the normal penetration of variable cross-section explosive formed projectile on rolled homogeneous armor steel. *Int. J. Impact Eng.*, 2019, vol. 129, pp. 12–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.02.008>
- [2] Wen K., Chen X.-W., Lu Y.-G. Research and development on hypervelocity impact protection using Whipple shield: an overview. *Def. Technol.*, 2020, vol. 17, no. 6, pp. 1864–1886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.11.005>
- [3] Wang X., Jiang J., Sun S., et al. Investigation on the spatial distribution characteristics of behind-armor debris formed by the perforation of EFP through steel target. *Def. Technol.*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 119–135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.05.016>
- [4] He Q.-G., Chen J.-F., Chen X. Velocity-space analysis method for hazardous fragments in debris clouds. *Int. J. Impact Eng.*, 2022, vol. 161, art. 104087. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104087>
- [5] Huang X., Li W., Li W., et al. Energy spatial distribution of behind-armor debris generated by penetration of explosively formed projectiles with different length–diameter ratio. *Appl. Sc.*, 2023, vol. 13, no. 4, art. 2665. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13042665>
- [6] Li D., Jiang J., Men J., et al. Numerical simulation of the fracture characteristics of copper EFP with different constitutive models. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1813, art. 012012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1813/1/012012>
- [7] Spear D.G., Palazotto A.N., Kemnitz R.A. Modeling and simulation techniques used in high strain rate projectile impact. *Mathematics*, 2021, vol. 9, no. 3, art. 274. DOI: <https://doi.org/10.3390/math9030274>
- [8] Baskakov V.D., Tarasov V.A., Kolpakov V.I., et al. Methodology for assessing the influence of design errors of projectile-forming charges on the accuracy of hitting the target and the penetrating effect of elongated striking elements. *Oboronnaya tekhnika*, 2010, no. 1-2, pp. 90–97 (in Russ.).
- [9] Asmolovskiy N.A., Baskakov V.D., Zarubina O.V. Research into the effect of technological imperfections of meniscus liners on explosive formation dynamics of high-speed rod elements. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2015, no. 5 (104), pp. 72–86 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2015-5-72-86>
- [10] Xing B.Y., Hou Y.H., Li T.H., et al. Analysis of kinetic energy of behind-armor debris generated during the normal penetration of EFP into armor steel. *Acta Armamentarii*, 2019, vol. 40, no. 10, pp. 2014–2021. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2019.10.006>
- [11] Fedorov S.V., Ladov S.V., Nikol'skaya Y.M., et al. Formation of a high-velocity particle flow from shaped charges with a liner consisting of a hemisphere and a degressive-thickness cylinder. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 479–482. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508217040128>

- [12] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Explosion physics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004.
- [13] Kolpakov V.I. [Analysis of design features of charges with low segmental cumulative facings made of tantalum alloys]. *Tr. Mezhdunar. konf. "XII Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya. Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny"* [Proc. Int. Conf. XII Kharitonov Thematic Scientific Readings. Extreme States of Matter. Detonation. Shock Waves]. Sarov, RFNC — VNIIEF Publ., 2015, pp. 288–290 (in Russ.).
- [14] Wang F., Wenyu N., Wang Z. Study on the forming performance of central perforated EFP warhead. *31st Int. Symposium on Ballistics*, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.12783/ballistics2019/33201>
- [15] Liu J.F., Long Y., Ji C., et al. Numerical and experimental study on the formation and dispersion patterns of multiple explosively formed penetrators. *Lat. Am. J. Solids Struct.*, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 685–699. DOI: <https://doi.org/10.1590/1679-78253385>
- [16] Baburin M.A., Eliseev S.V., Karnaukhov K.A., et al. Justification of the appropriate form EFPS stern. *Izvestiya RARAN*, 2020, no. 1, pp. 94–99 (in Russ.). EDN: KDHMRK
- [17] Cengel Y.A., Cimbala J.M. *Fluid mechanics. Fundamentals and applications*. New York, McGraw-Hill, 2013.
- [18] Baburin M.A., Baskakov V.D., Eliseev S.V., et al. Influence of geometric features of the peripheral part of the thin-walled spherical segment on the explosive throwing process. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 2 (131), pp. 76–87 (in Russ.).  
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2020-2-76-87>
- [19] Kruglov P.V., Kolpakov V.I. Mechanism of explosive formation of high-velocity elongated projectiles from steel segment lining. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2017, no. 12 (in Russ.).  
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>
- [20] Asmolovskiy N.A., Baskakov V.D., Boyarskaya R.V., et al. Mathematical modeling of shock loading of the meniscus liner. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody* [Mathematical Modeling and Computational Methods], 2016, no. 9, pp. 52–67 (in Russ.). EDN: WEAZAD
- [21] Huang X., Li W., Li W., et al. Energy spatial distribution of behind-armor debris generated by penetration of explosively formed projectiles with different length–diameter ratio. *Appl. Sc.*, 2023, vol. 13, no. 4, art. 2665. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13042665>
- [22] Gustafsson A. *Shaped charge design*. Karlstad, Karlstad University, 2021.

**Baburin M.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Baskakov V.D.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Eliseev S.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Head of Bench Test Laboratory, NIMI (Leningradskoe shosse 58, Moscow, 125212 Russian Federation).

**Ivanov D.A.** — Post-Graduate Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Karnaukhov K.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Tarasov V.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Baburin M.A., Baskakov V.D., Eliseev S.V., et al. Numerical simulation of the deflection effect of meniscus linings with the constant curvature and thickness profile on formation of the high-speed elements. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 2 (149), pp. 158–173 (in Russ.). EDN: TQMPER