

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ УПРАВЛЯЕМОЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОГИХ МЕНИСКОВЫХ ОБЛИЦОВОК ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ОБЖАТИИ

М.А. Бабурин<sup>1</sup>

В.Д. Баскаков<sup>1</sup>

С.В. Елисеев<sup>2</sup>

К.А. Карнаухов<sup>1</sup>

karnaukhov93@mail.ru

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

Экспериментальные и аналитические методы исследования потери устойчивости металлической менисковой облицовки при ее высокоскоростном деформировании (обжати, схлопывании) продуктами детонации взрывчатого вещества имеют ограниченные возможности. Они обусловлены сложным характером изменения толщины облицовки для управления процессом потери устойчивости (складкообразования), высокими скоростями деформирования оболочки, интенсивным спадом действующего на нее давления и рядом других особенностей. Предложен подход к численному трехмерному моделированию методом конечных элементов в системе координат Лагранжа в программном комплексе *LS-DYNA* процесса схлопывания облицовок менисковой формы переменной толщины в окружном направлении в области их периферийных частей и проанализированы основные этапы его реализации. Описаны основные параметры используемых моделей материалов, тип конечного элемента и механизм адаптивного перестроения расчетной сетки. Методом численного моделирования выявлены основные закономерности процесса потери устойчивости облицовки и складкообразования кормовых частей высокоскоростных элементов, формируемых при схлопывании облицовок. Результаты численных расчетов подтверждены

### Ключевые слова

*Потеря устойчивости, численное моделирование, менисковая облицовка, высокоскоростной элемент, складчатая кормовая часть, пластическая деформация*

экспериментальными данными. Выполненные исследования представляют интерес для специалистов, занимающихся анализом потери устойчивости различных конструкций при динамических нагрузках, а также для специалистов в области физики взрыва и удара

Поступила 01.11.2018

© Автор(ы), 2019

---

**Введение.** При дистанционном разрушении крупногабаритных объектов широко используются снарядоформирующие заряды (СФЗ). Принцип действия таких зарядов основан на схлопывании менисковой облицовки продуктами детонации, в результате чего происходит формирование высокоскоростного элемента (ВЭ), который движется со скоростью 1800...2500 м/с, а его полетная дистанция может достигать значений нескольких сотен диаметров заряда СФЗ [1, 2]. В настоящее время СФЗ применяют для дистанционного разрушения техники, инженерных сооружений, космических объектов, для предотвращения схода снежных лавин на горнолыжных курортах и пр. При этом требуется обеспечить высокую точность попадания ВЭ в объект разрушения, которая может быть достигнута за счет улучшения начальных кинематических параметров ВЭ и его формы. В типовых конструкциях СФЗ улучшение формы достигается формированием у ВЭ конической расширяющейся кормовой части, что позволяет сделать его полет к преграде более устойчивым к влиянию различных поперечных возмущений, обусловленных ветровым воздействием, погрешностями параметров конструкции СФЗ и другими факторами [2–5]. Комплексным улучшением формы ВЭ, позволяющим повысить скорость его взаимодействия с преградой, изменить коэффициенты его осевой силы, нормальной силы и момента сил и в результате повысить точность его попадания в цель, является формирование складчатой кормовой части у ВЭ, образуемой из периферийной области менисковой облицовки вследствие потери ее устойчивости в условиях периодического изменения толщины в окружном направлении (управляемая потеря устойчивости) [6–10].

*Цель работы* — установление основных закономерностей влияния изменений толщины облицовки менисковой формы в окружном направлении на потерю ее устойчивости и формирование складчатой кормовой части ВЭ, а также экспериментальная проверка этих закономерностей.

**Численное моделирование процесса и обсуждение результатов расчетов.** Объект исследования — лабораторные СФЗ № 1 и № 2 с точками инициирования, расположенными на оси. Принималось, что в каче-

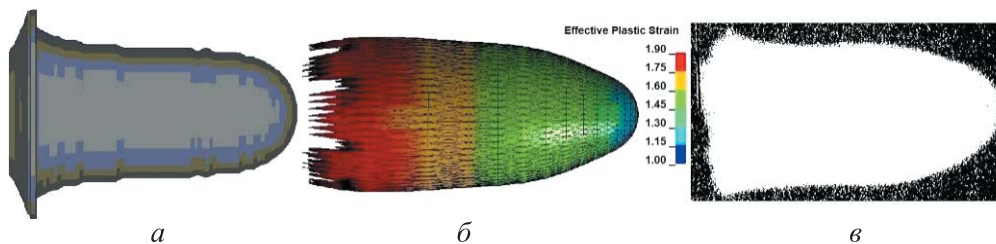
стве зарядов взрывчатого вещества (ВВ) использовался состав ТГ-40/60, а корпуса зарядов и облицовки диаметром  $d_0 = 64$  мм изготовлены из пластичных сталей [8–12]. Конструкции рассматриваемых зарядов различались по форме и геометрическим параметрам менисковых облицовок. Из облицовки СФЗ № 1 формировался ВЭ без выраженной кормовой части, а форма облицовки СФЗ № 2 принята такой, чтобы из нее формировался ВЭ с развитой конической кормовой частью [12]. Время  $t = 0$  в настоящих исследованиях являлось моментом инициирования ВВ.

### Основные геометрические параметры менисковых облицовок

|                                       | СФЗ № 1 | СФЗ № 2 |
|---------------------------------------|---------|---------|
| Радиус кривизны $R_0$ , мм .....      | 55      | 49,8    |
| Толщина облицовки $\delta$ , мм ..... | 2,45    | 2,2     |
| Прогиб $\Delta H$ , мм .....          | 11,5    | 12,3    |

На первом этапе проводились численные расчеты параметров СФЗ № 1 в программном комплексе *ANSYS AUTODYN* в системе координат Эйлера в двумерной осесимметричной постановке [12–14]. Система уравнений, описывающая двумерное осесимметричное течение в переменных Эйлера, имеет классический вид и приведена в работе [15]. Задача первого этапа — определение параметров материалов облицовки, корпуса и ВВ, обеспечивающих адекватность расчетов по экспериментальным данным.

В процессе расчетов определен динамический предел текучести  $Y_T = 650$  МПа менисковой облицовки (его значение не противоречит исследованиям, выполненным в работах [8–12]). Кроме того, для облицовки применялись гидродинамическая модель материала и уравнение состояния (УРС) Ми — Грюнайзена (плотность  $\rho = 7,85$  г/см<sup>3</sup>, модуль сдвига  $G = 80$  ГПа). Для стального корпуса принималась упругопластическая модель материала ( $\rho = 7,81$  г/см<sup>3</sup>, модуль Юнга  $\rho = 1,67$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ , динамический предел текучести  $Y_T = 250$  МПа). В качестве ВВ использовался аналог состава ТГ-40/60 с УРС Джонса — Уилкинса — Ли ( $\rho = 7,81$  /см<sup>3</sup>, скорость детонации  $D = 7750$  м/с, давление в точке Чепмена — Жуге  $P = 29,5$  ГПа). Результаты численных расчетов в двумерной осесимметричной постановке сравнивались с результатами импульсного рентгенографирования ВЭ. Форма, габаритные размеры и скорости ВЭ удовлетворительно совпали между собой (рис. 1, а, в), что подтвердило корректность принятых параметров в численной задаче.



**Рис. 1.** Конфигурация ВЭ СФЗ № 1 в момент времени  $t = 222$  мкс:  
 а — результат численного двумерного расчета в программном комплексе ANSYS AUTODYN; б — результат численного трехмерного расчета в программном комплексе LS-DYNA на поле распределения пластической деформации;  
 в — рентгенограмма

На *втором этапе* численные расчеты выполнялись в трехмерной постановке в программном комплексе LS-DYNA методом конечных элементов в системе координат Лагранжа с использованием перечисленных выше параметров материалов. Математическая модель рассматриваемой задачи с полным описанием уравнений движения, неразрывности, энергии с начальными и граничными условиями, calorическими уравнениями состояния материалов приведена в работе [11]. В программном комплексе LS-DYNA гидродинамическая модель \*MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_HYDRO для облицовки и упругопластическая модель \*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC для корпуса включают в себя механизмы разрушения по критерию допустимых деформаций и величине давления (физический критерий) [16–18]. Задача второго этапа — проверка адекватности полученных параметров материалов для численных расчетов в трехмерной постановке.

В качестве типа конечного элемента выбран четырехузловой тетраэдр ( $ELFORM = 13$ ). Схема построения расчетной сетки, число элементов принималось по рекомендации, приведенной в работах [9–11, 16]. В отличие от одноточечного четырехузлового элемента ( $ELFORM = 10$ ) конечный элемент  $ELFORM = 13$  используется для описания материалов с коэффициентом Пуассона  $\mu > 0$ . Выбор типа конечного элемента обусловлен необходимостью избавления от искажения формы ВЭ у его основания в процессе формирования. Искажения формы ВЭ (элемент становится несимметричным) наблюдаются при использовании методов сокращенного ( $ELFORM = 2$ ) или объемного интегрирования ( $ELFORM = 1$ ), в которых в качестве типа конечного элемента применяется восьмиузловой гексагональный элемент [16–18].

Для получения ВЭ с «наполненной» головной частью в программном комплексе LS-DYNA использовалась карта трехмерного адаптивного перестроения расчетной сетки \*CONTROL\_ADAPTIVE, в процессе приме-

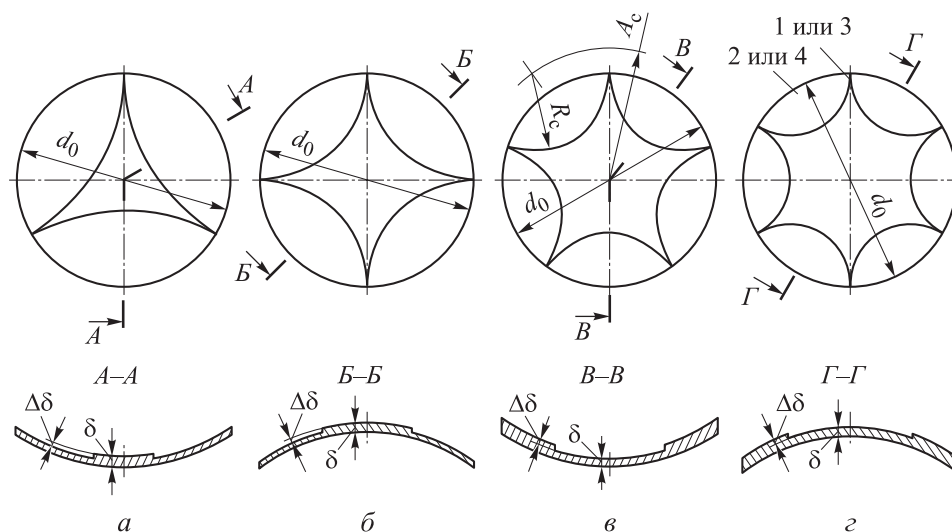
нения которой в трехмерной постановке задействуется конечный элемент  $ELFORM=13$ . Применение указанной карты обусловлено большими деформациями, возникающими в головной части ВЭ. С помощью принятой карты реализован геометрический критерий разрушения, который оценивает искажение конечного элемента по отношению его минимального размера к максимальному. Использование этого критерия позволяет предотвратить искажение конечных элементов в области больших пластических деформаций, увеличив при этом скорость и устойчивость расчета. Алгоритм создает новую сетку, которая инициализируется из старой сетки с помощью метода наименьших квадратов [17, 18].

Результаты численных расчетов в трехмерной постановке в программном комплексе  $LS-DYNA$  также сравнивались с результатами экспериментальных данных. Масса, габаритные размеры, внешний контур и скорость ВЭ удовлетворительно совпали с погрешностью не более 10 %. Исключение составляет форма кормовой части ВЭ (рис. 1, б, в).

Полученные результаты позволяют считать подход Лагранжа к расчету формы ВЭ в целом адекватным и использовать его при моделировании процесса складкообразования в кормовой части ВЭ.

На *третьем этапе* численных расчетов изучалась потеря устойчивости облицовок, для чего на периферийную часть менисковой облицовки СФЗ № 1 накладывались изменения толщины в виде круговых, периодически повторяющихся в окружном направлении сегментов с расстоянием между центрами сегментов и облицовки  $A_c$  при радиусе сегмента  $R_c$ . Рассматривались менисковые облицовки с числом круговых сегментов  $n = 3$  и  $n = 6$ , расположенных на внешней или внутренней поверхности. Круговые сегменты выполнены с понижениями или повышениями относительной толщины  $\Delta\bar{\delta} = \Delta\delta / \delta$ , где  $\Delta\delta$  — величина понижения или повышения толщины;  $\delta$  — номинальная толщина облицовки. Число  $n \geq 3$  круговых сегментов на периферии облицовки обеспечивает формирование ВЭ с числом  $n$  складок в кормовой части [19] (рис. 2).

Результаты расчетов показали, что основное различие ВЭ, сформированных из облицовок при  $n = 3$  и  $n = 6$ , состояло не только в числе складок, но и в длине складчатой кормовой части: если для  $n = 3$  длина складки составляет  $l_{ск} \approx 2l/3$  ( $l$  — длина ВЭ), то при  $n = 6$  —  $l_{ск} \approx l/2$ . Установлен рост эффективной (действующей) пластической деформации на текущем шаге  $t+1$  вычисления  $\bar{\varepsilon}_{m+1}^p = \bar{\varepsilon}_m^p + \Delta\bar{\varepsilon}^p$  ( $\bar{\varepsilon}_m^p$  — пластическая деформация на предыдущем шаге  $t$  вычисления;  $\Delta\bar{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \Delta\varepsilon_{ij}^p \Delta\varepsilon_{ij}^p}$  —



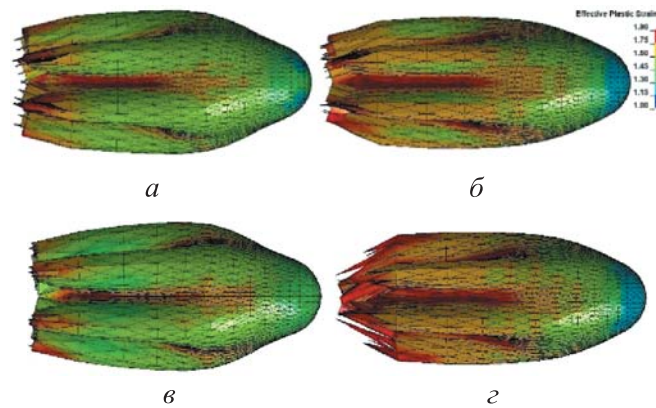
**Рис. 2.** Конфигурации облицовок диаметром  $d_0$  при  $n = 3$  (а), 4 (б), 5 (в) и 6 (г): а — понижение толщины на внутренней поверхности; б — понижение толщины на внешней поверхности; в — повышение толщины на внутренней поверхности; г — повышение толщины на внешней поверхности  $A_c = d_0 / 2 \cos(\pi / n)$ ,  $R_c = d_0 \operatorname{tg}(\pi / n) / 2$

прирост пластической деформации;  $\Delta \varepsilon_{ij}^p$  — девиатор приращений пластической деформации) в окружном направлении в головной части ВЭ при уменьшении числа  $n$  для облицовок с понижениями толщины на периферии, что может приводить к преждевременному разрушению ВЭ [17, 18]. В связи с этим дальнейшее всестороннее исследование потери устойчивости и процесса формирования ВЭ из облицовок с понижениями или повышениями толщины на внутренней или внешней поверхности проводились для  $n = 6$  (рис. 3).

Установлено, что складчатая кормовая часть ВЭ, сформированного из облицовки с понижениями толщины на внешней поверхности (облицовка 2), больше сжата, чем у ВЭ, сформированного из облицовки с понижениями толщины на внутренней поверхности (облицовка 1) (рис. 4). Кроме того, пластическая деформация достигает максимального значения  $\bar{\varepsilon}^p = \bar{\varepsilon}_{\max}^p = 1,9$  (область, выделенная красным цветом на рис. 3) на большей части ВЭ, если он сформирован из облицовки 1 (рис. 3, а, в). Это объясняется тем, что на образование складок для менисковой облицовки 2 влияет дополнительный слой ВВ.

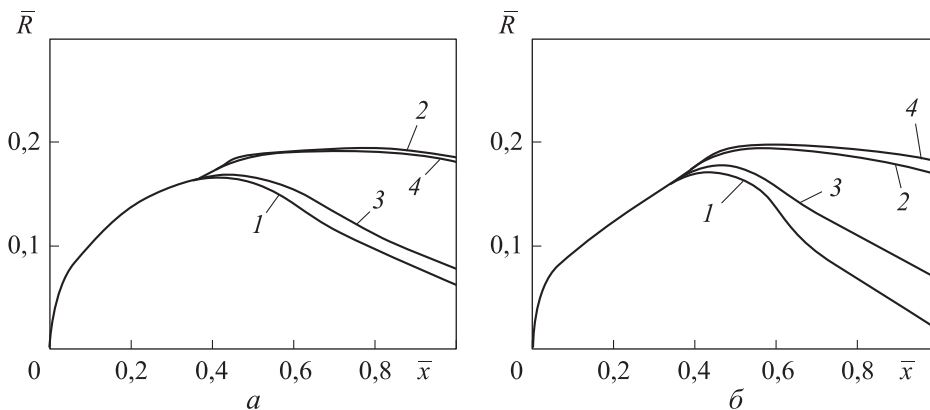
У ВЭ, сформированного из облицовки с повышением толщины на внешней поверхности (облицовка 3), область  $\bar{\varepsilon}^p = \bar{\varepsilon}_{\max}^p = 1,9$  больше, чем у ВЭ, сформированного из облицовки с повышением толщины на внутренней поверхности (облицовка 4) (рис. 3, б, г).





**Рис. 3.** Распределение пластической деформации на конфигурации ВЭ СФЗ № 1 (вид со стороны впадин) при  $n = 6$  в момент времени  $t = 222$  мкс для  $\Delta\bar{\delta} = 0,04$ :

*а* — понижение на внутренней поверхности облицовки; *б* — повышение на внутренней поверхности облицовки; *в* — понижение на внешней поверхности облицовки; *г* — повышение на внешней поверхности облицовки



**Рис. 4.** Зависимость относительного радиуса складки  $\bar{R} = R / d_0$  от относительной координаты точки  $\bar{x} = x / l$  вдоль оси ВЭ СФЗ № 1 для облицовок с повышениями толщины (*а*) и с понижениями толщины (*б*):

1, 2 — на внешней поверхности; 3, 4 — на внутренней поверхности; 1, 3 — впадины; 2, 4 — ребра

При сравнении между собой четырех ВЭ установлено: длина ВЭ, сформированных из облицовок 3 и 4, примерно на 10 % больше, чем у аналогичных ВЭ, сформированных из облицовок 1 и 2, что может быть связано с увеличением градиента осевой скорости по длине ВЭ на стадии его формирования при увеличении толщины периферийной части облицовки (см. рис. 3). Этот результат не противоречит данным, приведен-

ным в работе [12]. Уровень пластической деформации на ребрах складки больше для ВЭ, сформированных из облицовок 3, 4, и достигает значений  $\bar{\varepsilon}^P \approx 1,75$  (область, выделенная желтым цветом на рис. 3). Относительная величина  $\Delta\bar{\delta} = 0,04$  приводит к тому, что складка в кормовой части сходится к центру и может взаимодействовать со смежными складками.

Расчетами установлено, что при увеличении значения  $\Delta\bar{\delta}$  складки сходятся к центру сильнее, а области с максимальными значениями  $\bar{\varepsilon}^P$  увеличиваются и смещаются в сторону вершины ВЭ, что может приводить к его разрушению в меридиональных (продольных) направлениях.

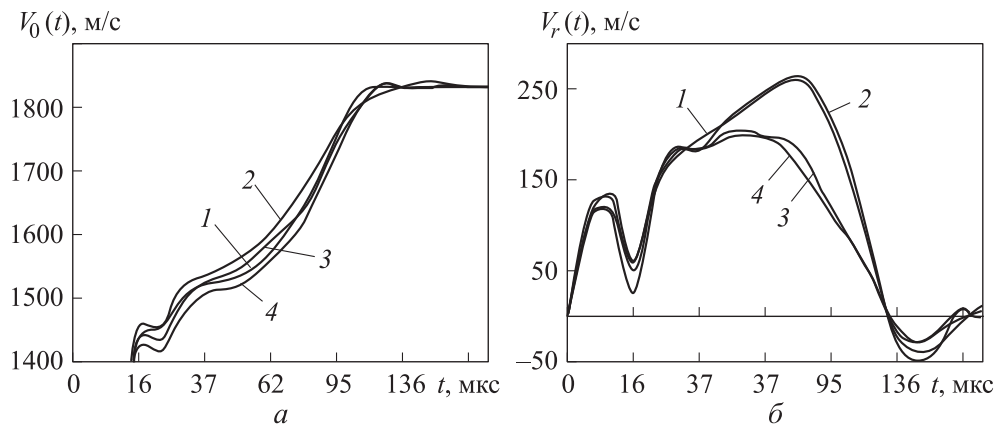
Результаты расчетов показали, что во всех рассмотренных вариантах облицовок в кормовой части формируются складки (см. рис. 3). Геометрию складки ВЭ можно характеризовать законами изменения его радиуса  $R = R(x)$  по впадине и по ребру вдоль оси  $x$  ВЭ (см. рис. 4).

Наибольшие складки по площади боковой поверхности формируются из облицовок с понижениями толщины на внешней поверхности менисковой облицовки (см. рис. 4), однако в этом случае складки получаются наиболее глубокими и их формирование может привести к радиальному схлопыванию складчатой кормовой части с последующим ее расходящимся движением от оси ВЭ и разрушением складок, что отмечено выше. На зависимостях также заметно различие размеров головных частей ВЭ, сформированных из облицовок с повыщениями и понижениями толщины.

Следует отметить, что в проанализированных вариантах функционирования СФЗ № 1 не удастся сформировать складки, эффективно влияющие на аэродинамические характеристики ВЭ. Очевидно, что в наибольшей степени влиять на аэродинамику ВЭ будут складки не только с развитой боковой поверхностью, но и имеющие ребра, значительно выступающие за контур основной части поперечного сечения ВЭ, и впадины не глубже этого контура. Для достижения этого результата понижения или повышения толщины в окружном направлении периферийной части следует выполнять на облицовке, форма меридиана которой отличается от дуги окружности. Например, можно использовать облицовки преимущественно менисковой формы с коническим основанием [12].

Механизм формирования складок в кормовой части ВЭ можно проанализировать с использованием зависимостей изменения осевой  $V_0 = V_0(t)$  и радиальной  $V_r = V_r(t)$  составляющих скорости движения элементов облицовки от времени  $t$  (рис. 5) ( $t=0$  — момент иницирования заряда ВВ). Зависимости построены для двух элементов, находящихся на одинаковом расстоянии от вершины облицовки. Один из них,





**Рис. 5.** Зависимости изменения осевой  $V_0 = V_0(t)$  и радиальной  $V_r = V_r(t)$  составляющих скорости движения элементов облицовки от времени  $t$ :

- 1, 2 — элементы, соответствующие облицовке с понижениями толщины;
- 3, 4 — элементы, соответствующие облицовке с повышениями толщины

элемент № 1 (или № 3), расположен на краю облицовки в области ( $n = 6$ ) номинальной толщины близко к вершине этой области, а второй, элемент № 2 (или № 4), — на краю облицовки с измененной толщиной в области кругового сегмента, в середине его дуги. Примерное место расположения элементов № 1 (или № 3) и № 2 (или № 4) на облицовке показано на рис. 2, г.

Результаты расчетов, представленные на рис. 5, выполнены для следующего варианта конструкции облицовки: в центральной области облицовки имеет номинальную толщину  $\delta$ , в области круговых сегментов — понижение или повышение на величину  $\Delta\bar{\delta} = 0,04$ , перепад толщины реализован на внутренней поверхности облицовки, при этом наружная поверхность облицовки, примыкающая к ВВ, представляла собой поверхность, соответствующую гладкой сфере. Облицовке с понижениями толщины соответствуют элементы № 1 и № 2, а с повышениями — № 3 и № 4.

Анализ зависимостей (см. рис. 5) показывает, что можно выделить две стадии формирования складки в кормовой части ВЭ при потере устойчивости облицовки: 1) стадию зарождения складки; 2) стадию развития складки. Зарождается складка на начальном этапе «выворачивания» облицовки вследствие различия осевых скоростей движения, например  $V_{01}$  и  $V_{02}$  элементов № 1 и № 2 соответственно. Завершается стадия зарождения складки к моменту времени  $t_1 \approx 37$  мкс, начиная с которого наблюдается существенное различие радиальных скоростей  $V_{r1}$  и  $V_{r2}$  элементов № 1 и № 2, причем  $V_{r1} > V_{r2}$ . К этому моменту времени

путь  $s_{01} = \int_0^{t_1} V_{01}(t) dt$ , пройденный элементом № 1 в осевом направлении,

будет меньше, чем путь  $s_{02} = \int_0^{t_1} V_{02}(t) dt$ , пройденный элементом № 2

в том же направлении (кривые 1 и 2, рис. 5, а). В радиальном направле-

нии пути  $s_{r1} = \int_0^{t_1} V_{r1}(t) dt$  и  $s_{r2} = \int_0^{t_1} V_{r2}(t) dt$ , пройденные элементами № 1

и № 2, будут примерно одинаковыми (кривые 1 и 2, рис. 5, б). Это означа-

ет, что именно осевое движение на первой стадии формирования складки определяет положение ее ребра и впадины: в том месте, где пройденный

путь в осевом направлении больше, т. е. в месторасположении элемента

№ 2, зарождается ребро складки. Соответственно для элемента № 1 начи-

нает формироваться впадина складки.

Вторая стадия — развитие складки, реализуется в интервале времени

$t_1 < t < t_2$ , где  $t_2 \approx 136$  мкс. Для нее характерно, прежде всего, превыше-

ние радиальной скорости  $V_{r1}$  элемента № 1 (соответствует впадине формируемой складки) над радиальной скоростью  $V_{r2}$  элемента № 2 (соот-

ветствует ребру формируемой складки) и постепенное сокращение различия значений осевых скоростей  $V_{01}$  и  $V_{02}$  данных элементов

(см. рис. 5). Очевидно, что на этой стадии формирования складки прой-

денные пути в радиальном направлении  $s_{r1} = \int_{t_1}^{t_2} V_{r1}(t) dt$  и  $s_{r2} = \int_{t_1}^{t_2} V_{r2}(t) dt$

элементами № 1 и № 2 различаются, причем  $s_{r1} > s_{r2}$  (рис. 4, б). Величина

$\Delta s_r = s_{r1} - s_{r2}$  соответствует глубине складки, т. е. разности значений радиальных координат ее гребня и впадины.

Формирование складки завершается в момент времени  $t = t_2$ , для ко-

торого характерно полное радиальное торможение ребра и впадины складки, т. е. выполнение условия  $V_{r1} \approx V_{r2} \approx 0$ . К этому моменту време-

ни выравниваются осевые скорости складок. Далее при  $t > t_2$  складки в кормовой части совершают только быстро затухающие колебания около

положения равновесия (см. рис. 5). Аналогичные рассуждения также справедливы и для элементов № 3 и № 4.

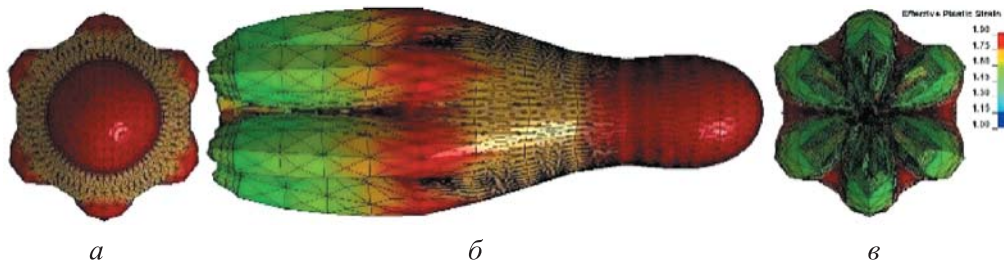
Следовательно, проведенные исследования, в которых расположение областей постоянной толщины на облицовке типа сферический мениск

можно представить в виде номинальной центральной области и круговых сегментов (см. рис. 2), показали: при потере устойчивости облицовки

ребро складки в кормовой части ВЭ формируется из периферийной об-

ласти облицовки с меньшей толщиной, а впадина — из области с большей толщиной. Этот вывод универсальный и распространяется на облицовки с  $n \geq 3$ , у которых толщина в круговых сегментах как меньше, так и больше толщины в центральном многоугольнике.

На четвертом этапе численные расчеты проводились для СФЗ № 2, результаты численных расчетов сравнивались с результатами экспериментальных данных. Менисковая облицовка выполнена с понижениями толщины при  $n = 6$  на внутренней поверхности с радиусом кругового сегмента  $R_c = 50$  мм, а расстояние от центров сегментов до облицовки  $A_c = 72$  мм. Амплитуда понижений толщины составила  $\Delta\bar{\delta} = 0,14$ , результаты расчетов представлены на рис. 6.



**Рис. 6.** Распределение пластической деформации на конфигурации ВЭ СФЗ № 2 при  $n = 6$  в момент времени  $t = 208$  мкс для понижений толщины  $\Delta\bar{\delta} = 0,14$  на внутренней поверхности:

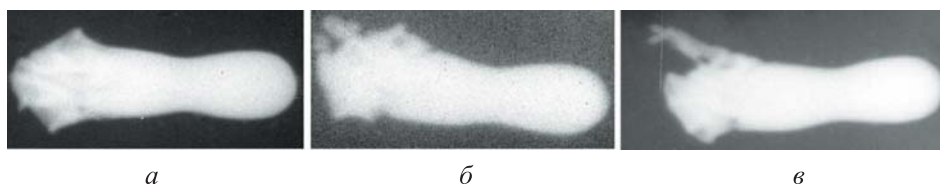
*a* — вид спереди; *б* — вид со стороны впадины; *в* — вид сзади

По результатам численных расчетов установлено, что толщина понижений  $\Delta\bar{\delta} = 0,14$  для облицовки СФЗ № 2 приводит к разрушению ВЭ в меридиональном направлении в области впадин складок и интенсивному разрушению на ребрах, а также к разгрузке ВЭ в головной части до значения  $\bar{\varepsilon}^p \approx 1,65$  (область, выделенная желтым цветом на рис. 6, б).

Кормовая складчатая часть ВЭ, полученного из СФЗ № 2, выступает за контур головной части больше, чем у ВЭ, полученного в результате функционирования СФЗ № 1 (см. рис. 3 и 6).

**Результаты экспериментальных данных.** Численные результаты сравнивались с результатами экспериментов. Рентгенограммы процесса функционирования СФЗ № 2 приведены на рис. 7. Рентгеноимпульсная съемка проводилась под разными углами к ВЭ.

Экспериментально установлено, что начальная скорость ВЭ составила  $V_0 = 2150$  м/с. Анализ рентгенограмм показывает, что к моменту времени  $t = 149$  мкс в кормовой части стального ВЭ сформировалась складчатая



**Рис. 7.** Рентгенограммы конфигураций ВЭ СФЗ № 2, сформированного из облицовки с понижениями толщины  $\Delta\bar{\delta} = 0,14$  на внутренней поверхности в моменты времени  $t = 149$  (а), 193 (б) и 209 мкс (в)

область (темные области с засветкой пленки в хвостовой части на рис. 7, а). В момент времени  $t = 209$  мкс корма разрушается в радиальном направлении, что соответствует численным расчетам, представленным на рис. 6.

Такая картина разрушения хвостовых элементов может быть связана не только с амплитудой понижения толщины облицовки, но и с погрешностями параметров конструкции облицовки и СФЗ в целом. Например, разнотолщинность периферийных областей менисковой облицовки может приводить к несимметричному схождению кормовой части ВЭ к центру и, следовательно, к несимметричному боковому удару складок.

Адекватность расчетных (см. рис. 6) и экспериментальных (см. рис. 7) данных также подчеркивает идентичность геометрии головных частей ВЭ: форма головной части близка к сферической; непосредственно за головной частью наблюдается утонение ВЭ.

В целом можно полагать, что форма и габаритные размеры ВЭ, полученных численным и экспериментальным путем, совпадают между собой, однако следует отметить разность начальных скоростей ВЭ, которая составляет порядка 11 %.

**Заключение.** Численными расчетами установлено:

1) из облицовки менисковой формы, в периферийной части которой в окружном направлении чередуются области переменной толщины, при динамическом схлопывании формируется ВЭ со складчатой кормовой частью, обусловленной потерей устойчивости облицовки;

2) периферийные области понижений толщины ( $n \geq 3$ ) менисковой облицовки формируют ребра складок, а периферийные области между понижениями — впадины складок;

3) периферийные области повышений толщины ( $n \geq 3$ ) облицовки формируют впадины складок, а периферийные области между повышениями — ребра складок;

4) увеличение амплитуды  $\Delta\bar{\delta}$  понижения или повышения толщины может приводить к разрушению ВЭ в меридиональном направлении по впадинам и ребрам складок;

5) уменьшение числа складок  $n$  приводит к возрастанию пластической деформации  $\bar{\varepsilon}^p$  в окружном направлении головной части ВЭ для облицовок с понижениями толщины на периферии, что может вызывать разрушение ВЭ в осевом направлении;

6) из облицовок с повышениями толщины в периферийной части формируются ВЭ со складками, имеющими на ребрах пластическую деформацию  $\bar{\varepsilon}^p$  больше, чем на ребрах ВЭ, сформированных из облицовок с понижениями, что может приводить к разрушению ВЭ в меридиональном направлении;

7) наибольшие по боковой проекции складки формируются из облицовок с понижениями, выполненными на внешней поверхности, однако в этом случае глубина складки становится максимальной по отношению к другим конфигурациям ВЭ;

8) осевое движение на стадии формирования складки определяет положение ее ребра и впадины, а радиальное — амплитуду складки ВЭ, сформированного из облицовки менисковой формы с переменной толщиной в окружном направлении.

Экспериментально подтверждено формирование складчатой кормовой части у ВЭ при использовании облицовок менисковой формы с переменной толщиной в окружном направлении; уровень понижений  $\Delta\bar{\delta} = 0,14$  приводит к разрушению складчатой кормовой части ВЭ в меридиональном направлении.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. Т. 2. М., ФИЗМАТЛИТ, 2004.
- [2] Селиванов В.В., ред. Боеприпасы. Т. 1. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
- [3] Ли В., Ван С., Чень К. Исследование технологии формирования устойчивого ударного ядра с юбкой. *ПМТФ*, 2016, т. 57, № 5, с. 151–157.
- [4] Liu J., Gu W., Lu M., et al. Formation of explosively formed penetrator with fins and its flight characteristics. *Defense Technology*, 2014, vol. 10, iss. 2, pp. 119–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2014.05.002>
- [5] Bender D., Chouk B., Fong R., et al. Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins. *Proc. 19th Int. Symp. Ballistics*, vol. 2, 2001, pp. 755–762.
- [6] Рассоха С.С., Ладов С.В., Бабкин А.В. Численное исследование механизма самозакрутки рифленых кумулятивных облицовок. *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Мат. Междунар. конф.* Саров, РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2013, с. 547–552.

[7] Бабкин А.В., Рассоха С.С., Ладов С.В. Методика расчета параметров функционирования вращающихся кумулятивных зарядов. *Оборонная техника*, 2010, № 1-2, с. 23–30.

[8] 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.

[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, с. 72–86.

DOI: 10.18698/0236-3941-2015-5-72-86

[10] Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Тарасов В.А. Анализ влияния периодических возмущений на формирование высокоскоростных стержневых элементов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 8, с. 8–14.

DOI: 10.18698/0536-1044-2013-8-8-14

[11] Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Боярская Р.В. и др. Математическое моделирование процесса взрывного нагружения менисковой облицовки. *Математическое моделирование и численные методы*, 2016, № 1 (9), с. 52–67.

DOI: 10.18698/2309-3684-2016-1-5267

[12] Круглов П.В., Колпаков В.И. Закономерности взрывного формирования удлиненных высокоскоростных элементов из стальных сегментных облицовок. *Актуальные проблемы разработки средств поражения и боеприпасов*, 2018, с. 203–2018.

[13] Baskakov V.D., Karnaukhov K.A. Research into the process of impingement of two plane jets of an ideal fluid with free boundaries. *J. Phys.: Conf. Series*, 2016, vol. 731, no. 1, art. 012002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/731/1/012002>

[14] Karnaukhov K.A., Baskakov V.D., Korenkov V.V., et al. Peculiarity of the shaped-charge liner collapse concerning the unevenness in its cross-section. *J. Phys.: Conf. Series*, 2017, vol. 894, no. 1, art. 012039. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/894/1/012039>

[15] Колпаков В.И., Савенков Г.Г., Мазур А.С. и др. Численное моделирование функционирования удлиненного кумулятивного заряда по железобетонной преграде. *ЖТФ*, 2015, т. 85, № 1, с. 3–9.

[16] Johnson G.R., Stryk R.A. Some considerations for 3D EFP computations. *Int. J. Impact Eng.*, 2006, vol. 32, iss. 10, pp. 1621–1634.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.01.011>

[17] Hallquist J.O. LS-DYNA theory manual. Livermore, LSTC, 2005.

[18] LS-DYNA keyword user's manual. Livermor, LSTC, 2007.

[19] Bigiel H.G. Insert for a projectile-forming charge. Patent 4590861 US. Appl. 13.05.1983, publ. 27.05.1986.



**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).

**Карнауков Кирилл Андреевич** — аспирант 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. Численный анализ управляемой потери устойчивости пологих менисковых облицовок при высокоскоростном обжатии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 4, с. 22–39. DOI: 10.18698/1812-3368-2019-4-22-39

**NUMERICAL ANALYSIS OF THE CONTROLLED LOSS OF STABILITY OF MENISCAL FORM LINERS AT HIGH-SPEED COLLAPSE**

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

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

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

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

karnaukhov93@mail.ru

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

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

<sup>2</sup> Mechanical Engineering Research Institute named after V.V. Bahirev, Moscow, Russian Federation

---

**Abstract**

Experimental and analytical research methods of losses of stability of meniscal form liners at their high-speed deformation, i.e., collapse, by products of detonation of explosive have limited opportunities. They are caused by the complicated nature of liner thickness change to

**Keywords**

*Loss of stability, numerical simulation, meniscal form liner, high speed element, folded after-body, plastic deformation*

control the operated loss of stability — folding, high-speed deformations of liners, intensive drop of pressure acting on them and some other features. The paper introduces an approach to numerical three-dimensional modeling of collapse of meniscal form liners with variable thickness in the circumferential direction in the area of their periphery, the modeling being carried out by the finite element method in Lagrange coordinate system in *LS-DYNA* software package. The study also shows the main stages of implementing this approach and describes the key parameters of the materials models used, as well as the type of the final element and mechanism of adaptive updating of the computational grid. By the method of numerical simulation, we found the main regularities of liners collapse and folding of the afterbody of high speed elements formed during the collapse of the liners. The results of numerical calculations are confirmed by experimental data. The studies done are of interest to specialists involved in the analysis of the loss of stability of various structures under dynamic loads, as well as to specialists in the field of explosion and impact physics

Received 01.11.2018

© Author(s), 2019

---

## REFERENCES

- [1] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva*. T. 2 [Explosion physics. Vol. 2]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004.
- [2] Selivanov V.V., ed. *Boepripasy*. T. 1 [Ammunition. Vol. 1]. Moscow, BMSTU Publ., 2016.
- [3] Li W., Wang X., Chen K. Research on the skirt tail explosively formed projectile stable shaping technology. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2016, vol. 57, iss. 5, pp. 894–899.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021894416050175>
- [4] Liu J., Gu W., Lu M., et al. Formation of explosively formed penetrator with fins and its flight characteristics. *Defense Technology*, 2014, vol. 10, iss. 2, pp. 119–123.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2014.05.002>
- [5] Bender D., Chouk B., Fong R., et al. Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins. *Proc. 19th Int. Symp. Ballistics*, vol. 2, 2001, pp. 755–762.
- [6] Rassokha S.S., Ladov S.V., Babkin A.V. [Numerical research on self-tightening mechanism of rippled cumulative liners]. *Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny. Mat. Mezhdunar. konf.* [Extreme states of substance. Detonation. Shock waves. Proc. Int. Conf.]. Sarov, RFYaTs–VNIIEF Publ., 2013, pp. 547–552 (in Russ.).
- [7] Babkin A.V., Rassokha S.S., Ladov S.V. Calculation method for operating parameters of spinning cumulative charges. *Oboronnaya tekhnika*, 2010, no. 1-2, pp. 23–30 (in Russ.).

- [8] Kolpakov V.I., Baskakov V.D., Shikunov N.V. Mathematical modelling of explosively formed projectile operating taking into account technological asymmetry. *Oboronnaya tekhnika*, 2010, no. 1-2, pp. 82–89 (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, pp. 72–86 (in Russ.).  
DOI: 10.18698/0236-3941-2015-5-72-86
- [10] Asmolovskiy N.A., Baskakov V.D., Tarasov V.A. The impact of periodic disturbances on the formation of high-speed rod elements. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 8, pp. 8–14 (in Russ.).  
DOI: 10.18698/0536-1044-2013-8-8-14
- [11] 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. 1 (9), pp. 52–67 (in Russ.). DOI: 10.18698/2309-3684-2016-1-5267
- [12] Kruglov P.V., Kolpakov V.I. [Mechanism of explosive formation of high-velocity elongated projectiles from steel segment lining]. *Aktualnye problemy razrabotki sredstv porazheniya i boepripasov* [Actual Problems of Weapons and Ammunition Development], 2018, pp. 203–2018 (in Russ.).
- [13] Baskakov V.D., Karnaukhov K.A. Research into the process of impingement of two plane jets of an ideal fluid with free boundaries. *J. Phys.: Conf. Series*, 2016, vol. 731, no. 1, art. 012002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/731/1/012002>
- [14] Karnaukhov K.A., Baskakov V.D., Korenkov V.V., et al. Peculiarity of the shaped-charge liner collapse concerning the unevenness in its cross-section. *J. Phys.: Conf. Series*, 2017, vol. 894, no. 1, art. 012039. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/894/1/012039>
- [15] Kolpakov V.I., Savenkov G.G., Mazur A.S., et al. Numerical simulation of the efficiency of an extended cumulative charge acting against an armed concrete obstacle. *Tech. Phys.*, 2015, vol. 60, iss. 1, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784215010156>
- [16] Johnson G.R., Stryk R.A. Some considerations for 3D EFP computations. *Int. J. Impact Eng.*, 2006, vol. 32, iss. 10, pp. 1621–1634.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.01.011>
- [17] Hallquist J.O. LS-DYNA theory manual. Livermore, LSTC, 2005.
- [18] LS-DYNA keyword user's manual. Livermor, LSTC, 2007.
- [19] Bigiel H.G. Insert for a projectile-forming charge. Patent 4590861 US. Appl. 13.05.1983, publ. 27.05.1986.

**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 the Bench Tests Laboratory, Mechanical Engineering Research Institute named after V.V. Bahirev (Leningradskoe shosse 58, Moscow, 125212 Russian Federation).

**Karnaukhov K.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).

**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 analysis of the controlled loss of stability of meniscal form liners at high-speed collapse. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 4, pp. 22–39 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2019-4-22-39