

Научная статья

УДК 539.3:629.78

doi: 10.17223/19988621/82/7

## О некоторых особенностях разрушения высокоскоростных частиц на гофрированных противометеорных сеточных экранах

Дмитрий Борисович Добрица<sup>1</sup>, Юрий Федорович Христенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НПО им. С.А. Лавочкина», Химки, [dobritsaDB@laspace.ru](mailto:dobritsaDB@laspace.ru)

<sup>2</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия, [hrr@niipmm.tsu.ru](mailto:hrr@niipmm.tsu.ru)

**Аннотация.** Исследован процесс воздействия высокоскоростных частиц на гофрированные сеточные металлические экраны. С использованием сеточного лагранжева метода Уилкинса в 3D-постановке решен ряд задач численного моделирования высокоскоростного соударения при различных углах наклона гофры и разном положении точки первоначального контакта экрана с ударником. Проведено сравнение параметров запреградного облака продуктов разрушения в различных задачах при одинаковом расстоянии, преодоленном пробившей экран частицей, с целью выбора оптимального угла наклона гофры.

**Ключевые слова:** высокоскоростное соударение, сеточный экран, противометеорная защита, численное моделирование

**Для цитирования:** Добрица Д.Б., Христенко Ю.Ф. О некоторых особенностях разрушения высокоскоростных частиц на гофрированных противометеорных сеточных экранах // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 82. С. 82–96. doi: 10.17223/19988621/82/7

Original article

## On some features of the destruction of high-speed particles on debris corrugated mesh shields

Dmitriy B. Dobritsa<sup>1</sup>, Yury F. Khristenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lavochkin Association, Khimki, Russian Federation, [dobritsaDB@laspace.ru](mailto:dobritsaDB@laspace.ru)

<sup>2</sup> Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, [hrr@niipmm.tsu.ru](mailto:hrr@niipmm.tsu.ru)

**Abstract.** This paper studies the impact of high-speed particles on corrugated metal mesh shields. Numerical solutions to a number of problems on high-speed interaction at different corrugation angles and positions of the initial contact point of the shield and impactor are solved using the grid Wilkins Lagrangian method in a three-dimensional formulation. The parameters of the behind-the-barrier cloud of destruction products are

compared for various problems with the same distance traveled by the particle perforating the shield. Thus, the optimal inclination angle of the corrugation is revealed.

**Keywords:** high-speed impact, mesh shield, debris protection, numerical simulation

**For citation:** Dobritsa, D.B., Khristenko, Yu.F. (2023) On some features of the destruction of high-speed particles on debris corrugated mesh shields. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 82. pp. 82–96. doi: 10.17223/19988621/82/7

## Введение

Защита космических аппаратов (КА) и их узлов от воздействия метеоро-техногенных тел (МТТ) является одним из актуальных направлений исследований и практических работ в космонавтике, так как соударение с высокоскоростными частицами представляет собой серьезную угрозу для штатного функционирования КА.

Сеточные экраны применяются в космонавтике в течение значительного времени, баллистические уравнения для них разработаны в 90-е гг. прошлого века [1]. Экспериментальные исследования пробития сеточных экранов достаточно трудоемки, так как для построения баллистической кривой требуется провести большой объем экспериментов с различными комбинациями основных параметров соударения – массы ударника, скорости и угла соударения, причем следует учитывать неопределенность, возникающую из-за разной реакции при попадании ударника в различные точки экрана с учетом его неоднородности. Поэтому наиболее распространены комбинированные исследования [2–5] с применением эксперимента и численного моделирования, что позволяет получить наиболее полную картину соударения, особенно при выборе в качестве защитного экрана геометрически неоднородной структуры (например, гофрированной сетки).

Данная работа является продолжением серии авторских работ, посвященных исследованию противометеорной защиты в виде гофрированных сеточных экранов [6–10]. Рост эффективности сеточной преграды при гофрировании был обоснован экспериментально [9]. В проведенном с использованием легкогазовой двухступенчатой установки эксперименте ударники в виде алюминиевых шариков диаметром 1.5 мм ускорялись до скоростей порядка 5 км/с.

В работе [10] представлены результаты численного моделирования, направленного на выявление влияния угла гофрирования металлической сетки на ее защитные свойства при использовании в качестве противометеорного экрана. Проводилось моделирование соударения шарика диаметром 1.5 мм с металлической сеткой под углом от 15 до 75° (с соблюдением идентичности удельной массы экрана, рассчитанной по нормали к вектору скорости). Итоги работы показали резкое возрастание степени дробления ударника при угле соударения  $\alpha$  не менее 60° с проявлением «эффекта терки», выражающегося в интенсивном дроблении контактирующего края высокоскоростного тела, проникающего через сеточную преграду.

Исследование кумулятивного эффекта при пробитии плоских (образованных наложением проволоки) сеток проводилось в работах [3, 11]. В работе [11] оценка кумулятивного эффекта дана в виде относительного приращения максимальной скорости частиц ударника к первоначальной скорости соударения.

Настоящая работа является продолжением работы [10], ее целями являются:

1) проведение численного моделирования высокоскоростного соударения сферической частицы с тканой металлической сеткой на комплексе собственной разработки, отличном от использовавшегося в работе [10], и сравнение полученных результатов;

2) сравнение параметров главного фрагмента запреградного облака продуктов разрушения (ЗОПР) для разных углов наклона гофры при условии одинакового пробега ударника во всех задачах, что позволяет учитывать габаритные ограничения в реальной противометеорной конструкции, не позволяющие произвольным образом увеличивать расстояние от внешнего защитного экрана до защищаемой стенки;

3) сравнение результатов решения задачи для различных вариантов положения первоначального контакта ударника и сеточной преграды;

4) оценка кумулятивного эффекта, возникающего при высокоскоростном пробитии сеточных преград с различным углом наклона.

Численное моделирование высокоскоростного взаимодействия твердых тел с защитными конструкциями, рассматриваемыми в данной работе, позволяет воспроизвести характерные особенности физических процессов, протекающих при соударении, а также оценить работоспособность защитных экранов и подобрать их оптимальные схемы. В лагранжевой 3D-постановке рассматривается процесс фрагментации высокоскоростного ударника на сеточных преградах при различных углах соударения.

### Определяющие соотношения

Для описания процессов деформирования и дробления твердых тел используется модель прочного сжимаемого идеально упругопластического тела. Основные соотношения, описывающие движение сплошной среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии и замыкаются соотношениями Прандтля–Рейсса при условии текучести Мизеса [12–14]. Уравнение состояния берется в форме Ми – Грюнайзена [12].

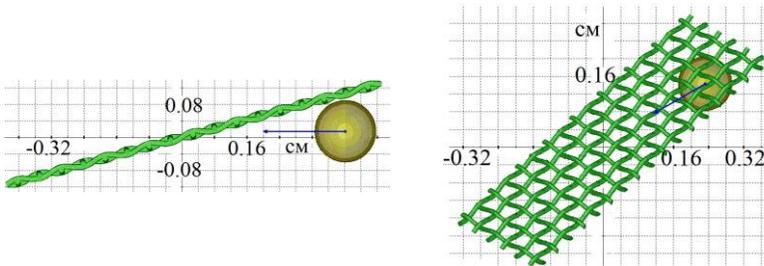
Для расчета упругопластических течений используется метод Уилкинса [13, 14], реализованный на тетраэдрических ячейках.

Для моделирования контактных взаимодействий используется метод расчета поверхности контакта соударяющихся тел, в котором их границы участвуют симметричным образом [15–17]. Граничные условия на контактных поверхностях предполагают идеальное скольжение и непротекание по нормали в зоне контакта. Моделирование разрушения осуществляется при помощи раздвоения разностной сетки по узлам в областях возникновения макронарушений сплошности материала и явного описания поверхности разрушения [18]. В качестве критерия разрушения используется деформационный критерий разрушения [19], срабатывающий при превышении критического значения эквивалентной пластической деформации в узле пространственной сетки. При выполнении критического условия в узле происходит раздвоение с образованием свободной поверхности в виде микротрещины с плоскостью, совпадающей с главной площадкой, соответствующей  $\sigma_1$ . В качестве модели пластических деформаций материала используется модель Штейнберга–Гуинана [20].

### Исходные данные в задачах численного моделирования

С помощью численного моделирования исследован ряд задач высокоскоростного соударения сферической частицы с гофрированными экранами из металлической сетки. В качестве ударника использован алюминиевый шарик диаметром 1.5 мм, движущийся со скоростью 5 км/с. Алюминий наилучшим образом подходит для моделирования техногенного вещества (плотность частиц самых значимых диапазонов размеров – 0.1–0.25 см и 0.25–0.5 см – составляет согласно ГОСТ 25645.167–2005 соответственно 2.5 и 2.7 г/см<sup>3</sup>), а также метеороидов в виде хондритов.

Гофрированный сеточный защитный экран смоделирован как наклонный участок тканой стальной сетки, при предположении, что шаг гофры существенно больше характерного размера метеороида (рис. 1).



**Рис. 1.** Начальная конфигурация. Угол наклона гребней гофры 75°  
**Fig. 1.** Initial configuration. The angle of inclination of corrugation ridges is 75°

Построение тетраэдрических сеток при разбиении простых фигур (шар, цилиндр – проволока сетки) выполнено прямыми методами на основе шаблонов [21].

Удар во всех задачах численного моделирования (ЧМ) осуществлен по нормали к экрану, т.е. угол соударения  $\alpha$ , измеренный от нормали к экрану, аналогичен углу наклона гофры (для плоской сетки без гофрирования  $\alpha = 0^\circ$ ). Исследовано влияние угла  $\alpha$  на характер разрушения частицы и эффективность защитных свойств подобного экрана. В эксперименте из работы [9] в качестве гофрированной мелкой сетки использовалась стальная сетка с проволокой диаметром  $d_w = 0.2$  мм и апертурой (размер просвета)  $l_a = 0.356$  мм. Шаг такой сетки  $h = 0.556$  мм ( $h = l_a + d_w$ ), ее поверхностная плотность  $\rho_A = 0.95$  кг/м<sup>2</sup>. При  $\alpha = 45^\circ$ , как в эксперименте, удельная масса такого экрана (т.е. его поверхностная плотность, рассчитанная относительно перпендикулярной к направлению удара плоскости) составляет  $\rho_A = 1.34$  кг/м<sup>2</sup>. При изменении  $\alpha$  удельная масса экрана оставалась неизменной, что обеспечивалось изменением диаметра проволоки с сохранением одинакового шага сетки, параметры которой представлены в табл. 1.

Поскольку темп решения задачи при появлении большого количества осколков значительно замедляется из-за роста длительности работы процедур реализации контактных алгоритмов, во всех задачах использовано упрощение, заключающееся в ограничении рассматриваемого объема, на котором фиксируются контакты фрагментов, после проникновения ударника через защитный экран –

после этого момента контакты фиксируются только в районе главного фрагмента ударника.

Таблица 1

**Параметры сетки для гофрированных сеточных экранов равной удельной массы**

Угол наклона $\alpha$ , град.	0	15	30	45	60	75
Диаметр проволоки $d_w$ , мм	0.25	0.243	0.231	0.200	0.178	0.130
Апертура ячейки сетки $l_a$ , мм	0.306	0.313	0.325	0.356	0.378	0.426
Шаг сетки $h$ , мм	0.556	0.556	0.556	0.556	0.556	0.556

В табл. 2 приведены рассчитанные конфигурации с указанием количества ячеек в задачах.

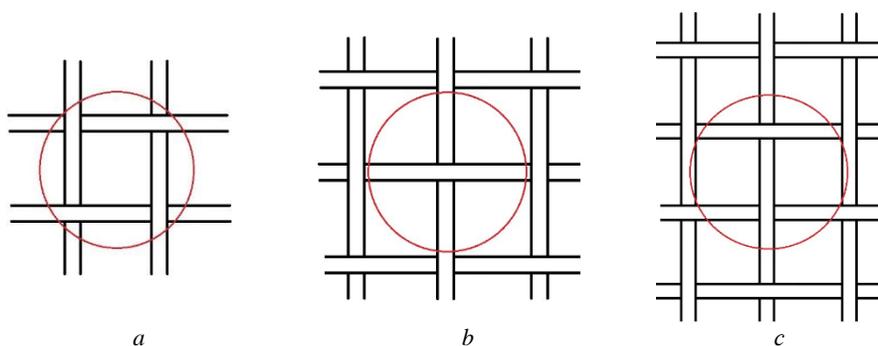
Таблица 2

**Количество тетраэдрических ячеек в различных вариантах счетной задачи**

Угол наклона $\alpha$ , град.	0	15	30	45	60	75
Удар в горизонтальную проволоку	563 328	530 928	639 360	379 296	452 448	–
Удар в центр просвета ячейки сетки	511 488	530 928	639 360	379 296	452 448	557 952
Удар в узел	628 560	583 200	578 016	338 112	503 136	608 128
Удар в вертикальную проволоку	–	583 200	578 016	338 112	503 136	–

Для задачи с  $\alpha = 75^\circ$  рассмотрены только варианты попадания ударника в вертикально направленную проволоку или между соседними вертикальными проволоками. Для  $\alpha = 0^\circ$  удар в горизонтальную проволоку аналогичен удару в вертикальную проволоку.

На рис. 2 схематически показаны различные варианты конфигураций точки первоначального контакта ударника и преграды, которые использованы в данной работе.



**Рис 2.** Конфигурации точки первоначального контакта ударника и преграды:

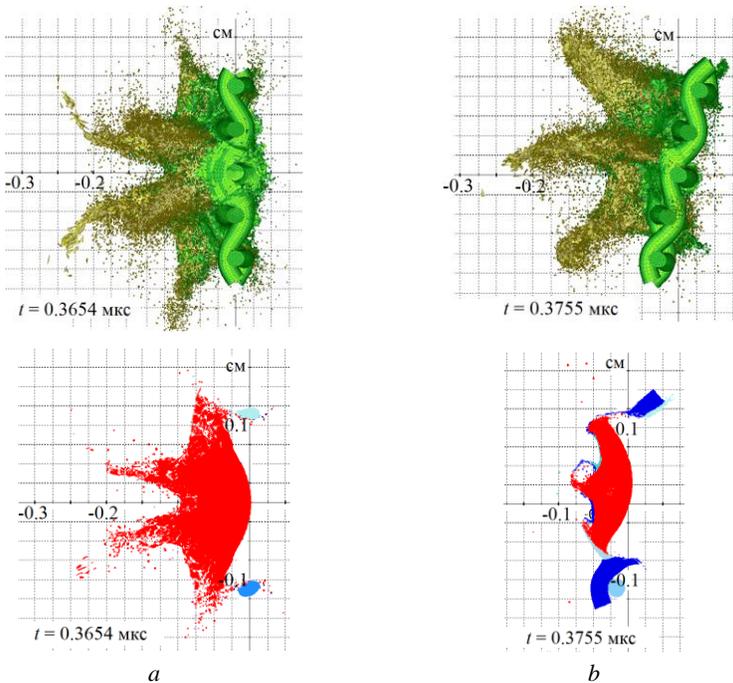
*a* – удар в центр просвета ячейки; *b* – удар в узел; *c* – удар в проволоку

**Fig. 2.** Initial configurations of an impactor-barrier contact point: (*a*) impact to the center of a cell gap, (*b*) impact to the node, and (*c*) impact to the wireline

### Результаты моделирования и их обсуждение

На рис. 3 отражено состояние пары «ударник–преграда» для выбранных типов расчетных конфигураций в момент проникновения за защитный экран, который определяется как положение, при котором все ячейки наибольшего фрагмента ударника (учитывая, что он разрушается при прохождении через преграду) прошли через плоскость экрана. При углах соударения  $60^\circ$  и более видна гораздо более значительная степень дробления ударника, чем при прямом соударении. Для угла соударения  $75^\circ$  (см. рис. 3, *f*) расчет на момент фиксации велся по упрощенному алгоритму – все мелкие фрагменты, которые отдалялись от створа сеточной преграды, в процессе расчета были удалены.

В табл. 3 отражены результаты численного расчета основных характеристик ударника в момент проникновения за защитный экран, в том числе в сравнении с данными из работы [10], в которой не проводился расчет для угла  $0^\circ$ . В качестве варианта первоначальной конфигурации для данной работы взят удар в вертикальную проволоку сетки.



**Рис. 3, a, b.** Результат численного решения задачи взаимодействия ударника – сферической частицы размером 1.5 мм с сеточным экраном на скорости 5 км/с, в момент проникновения за экран. Верхний рисунок – 3D-вид; нижний рисунок – вид в сечении для углов гофры: *a* –  $0^\circ$ ; *b* –  $15^\circ$

**Fig. 3, a, b.** Numerical solution to the problem of the interaction between the impactor (a spherical particle 1.5 mm in size) and the mesh shield at a speed of 5 km/s at the moment of the impactor penetration beyond the shield. Top figure is a 3D view; bottom figure is a sectional view for various corrugation angles: (a)  $0^\circ$ , and (b)  $15^\circ$

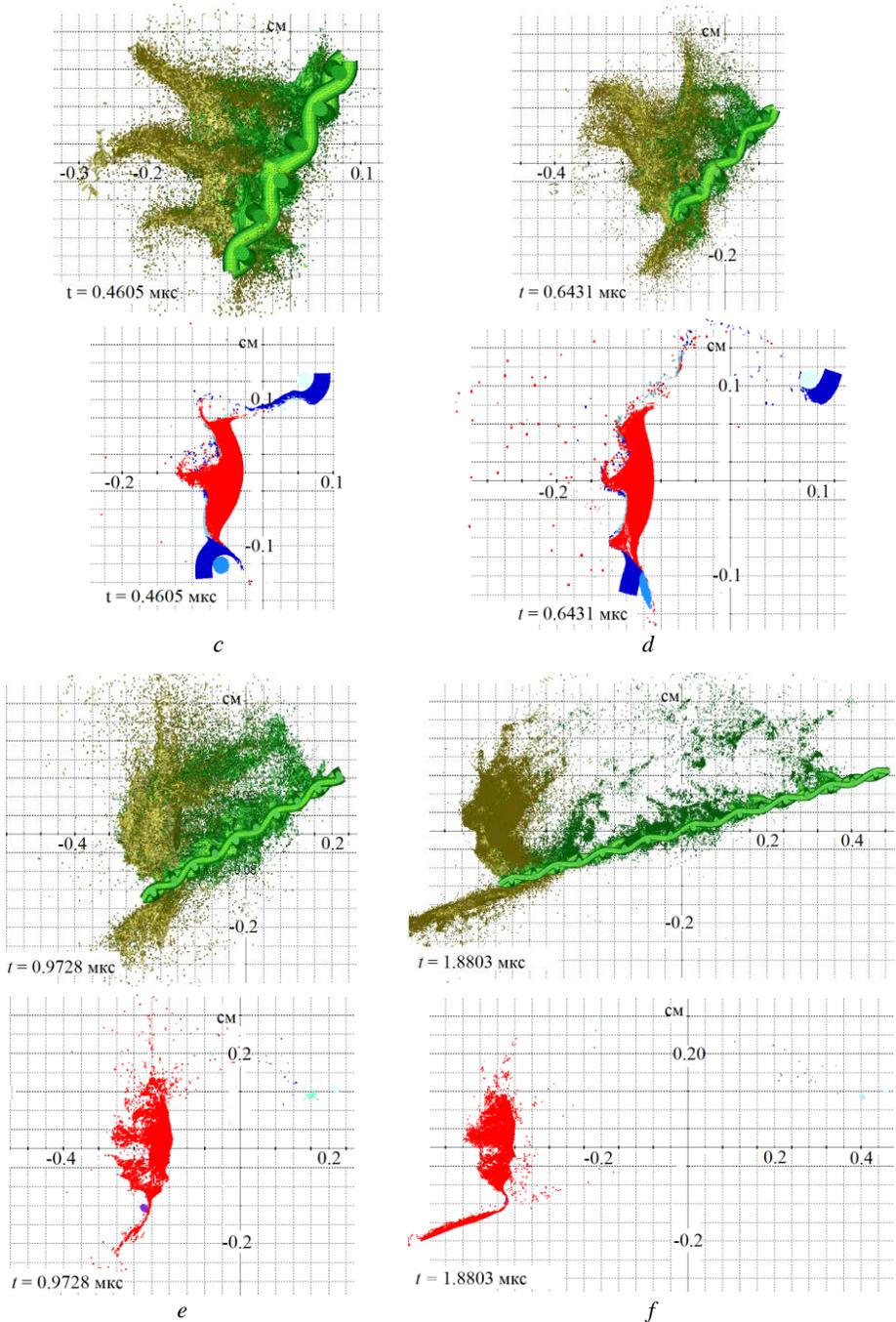


Рис. 3, *c, d, e, f*. Верхний рисунок – 3D-вид; нижний рисунок – вид в сечении для углов гофры: *c* –  $30^\circ$ ; *d* –  $45^\circ$ ; *e* –  $60^\circ$ ; *f* –  $75^\circ$

Fig. 3, *c, d, e, f*. Top figure is a 3D view; bottom figure is a sectional view for various corrugation angles: (*c*)  $30^\circ$ , (*d*)  $45^\circ$ , (*e*)  $60^\circ$ , and (*f*)  $75^\circ$

Распределение массы ударника в облаке фрагментов, %. Сравнение результатов

Угол наклона гофры, град.		0	15	30	45	60	75
$M_{mf}/M_0$	Расчет [10]	–	0.80	0.66	0.60	0.55	0.12
	Данная работа	0.57	0.59	0.51	0.42	0.30	0.13
Мелкие фрагменты, пробившие сетку	Расчет [10]	–	0.20	0.34	0.32	0.31	0.33
	Данная работа	0.43	0.41	0.48	0.51	0.57	0.52
$M_e/M_0$	Расчет [10]	–	0.0	0.0	0.08	0.14	0.55
	Данная работа	0.0	0.0	0.01	0.07	0.13	0.35

Примечание.  $M_{mf}$  – масса основного фрагмента, пробившего сетку,  $M_0$  – первоначальная масса ударника,  $M_e$  – масса срикшетиравших фрагментов ударника.

Полученные результаты свидетельствуют о возрастании эффективности гофрированного сеточного экрана, при значениях угла  $\alpha > 45^\circ$ .

На рис. 4, 5 показан процесс проникания ударника через сеточную преграду при  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 60^\circ$  соответственно как результат решения задачи ЧМ.

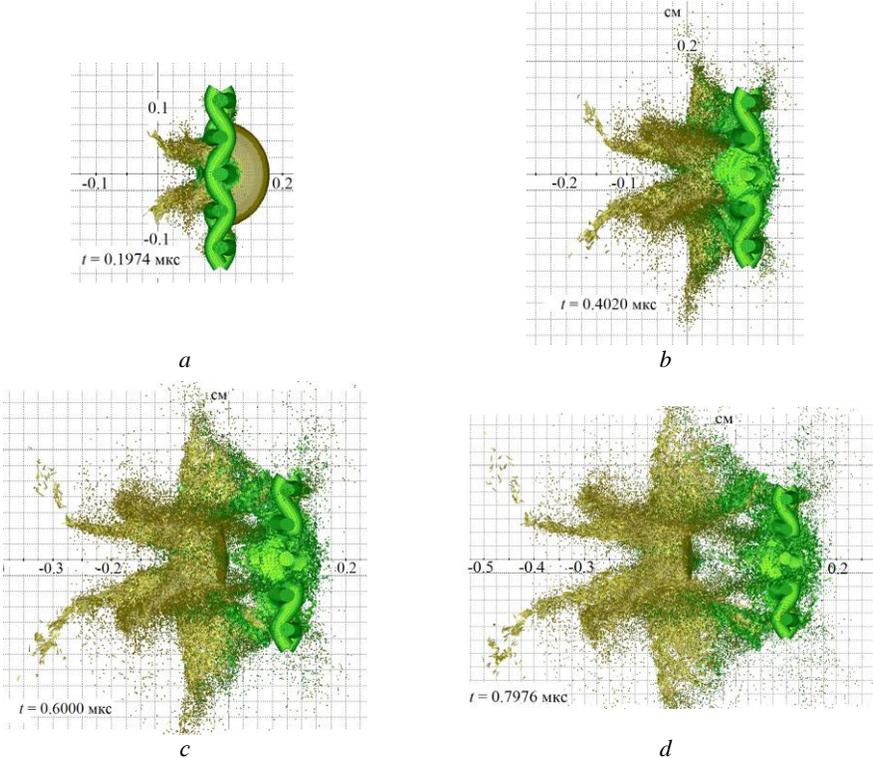
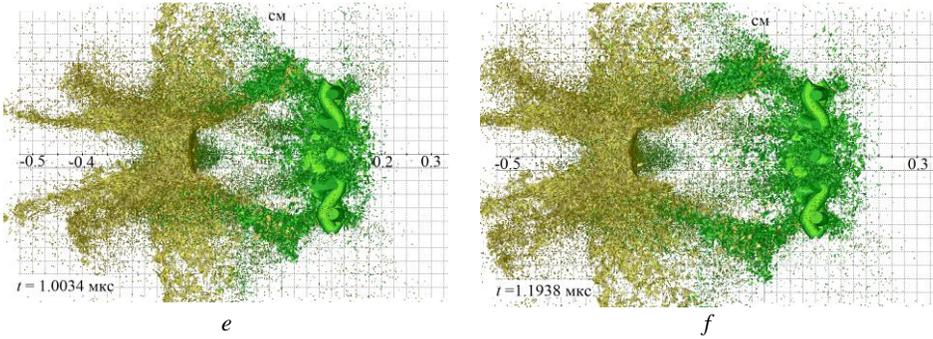


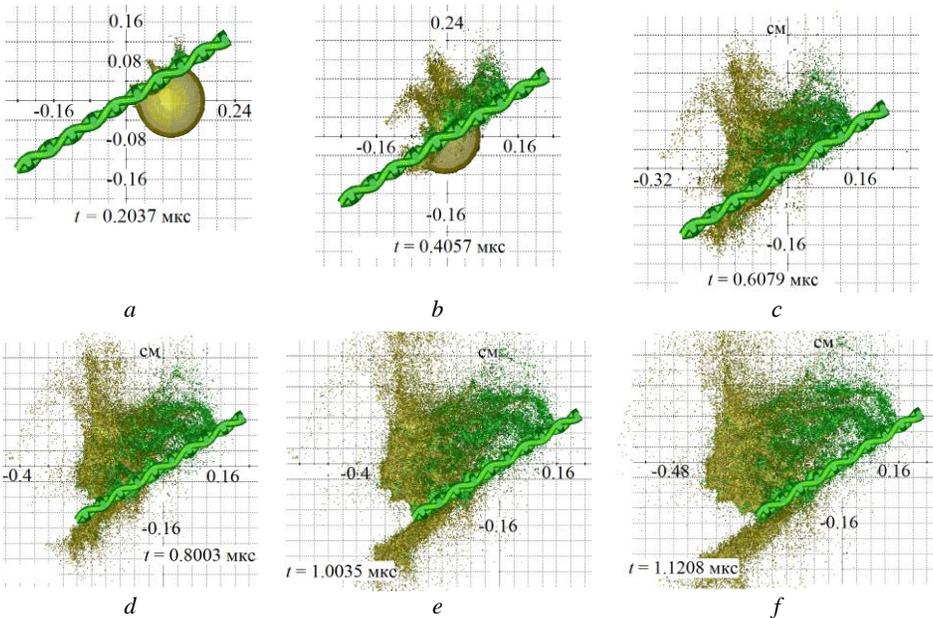
Рис. 4, a, b, c, d. Результат численного решения задачи взаимодействия ударника с сеточным экраном для угла гофры  $\alpha = 0^\circ$  в различные моменты времени:

a – 0.2 мкс; b – 0.4 мкс; c – 0.6 мкс; d – 0.8 мкс; e – 1.0 мкс; f – 1.2 мкс

Fig. 4, a, b, c, d. Numerical solution to the problem of the interaction between the impactor and the mesh shield for a corrugation angle  $\alpha = 0^\circ$  at different time instants: (a) 0.2, (b) 0.4, (c) 0.6, and (d) 0.8



**Рис. 4, e, f.** Результат численного решения в различные моменты времени:  $a - 0.2$  мкс;  $b - 0.4$  мкс;  $c - 0.6$  мкс;  $d - 0.8$  мкс;  $e - 1.0$  мкс;  $f - 1.2$  мкс  
**Fig. 4, e, f.** Numerical solution to the problem at different time instants: (e) 1.0, and (f) 1.2  $\mu$ s



**Рис. 5.** Результат численного решения задачи взаимодействия ударника с защитным экраном для угла гофры  $\alpha = 60^\circ$  в различные моменты времени:  $a - 0.2$  мкс;  $b - 0.4$  мкс;  $c - 0.6$  мкс;  $d - 0.8$  мкс;  $e - 1.0$  мкс;  $f - 1.1$  мкс

**Fig. 5.** Numerical solution to the problem of the interaction between the impactor and the protective shield for a corrugation angle  $\alpha = 60^\circ$  at different time instants: (a) 0.2, (b) 0.4, (c) 0.6, (d) 0.8, (e) 1.0, and (f) 1.1  $\mu$ s

Для угла соударения  $60^\circ$  характерно отсутствие направленного вдоль траектории ударника кумулятивного эффекта, проявляющегося при прямом соударении в виде характерных щупальцеобразных локальных скоплений (как на рис. 4) высокоскоростных фрагментов. На рис. 6 представлено численное решение задачи для углов от  $0, 30$  и  $60^\circ$  в момент проникания ударника за защитный экран в градации по скорости движения фрагментов. Очевидно, что для большого угла

наклона кумулятивный выброс частиц в направлении защищаемой конструкции не представляет собой значимой угрозы.

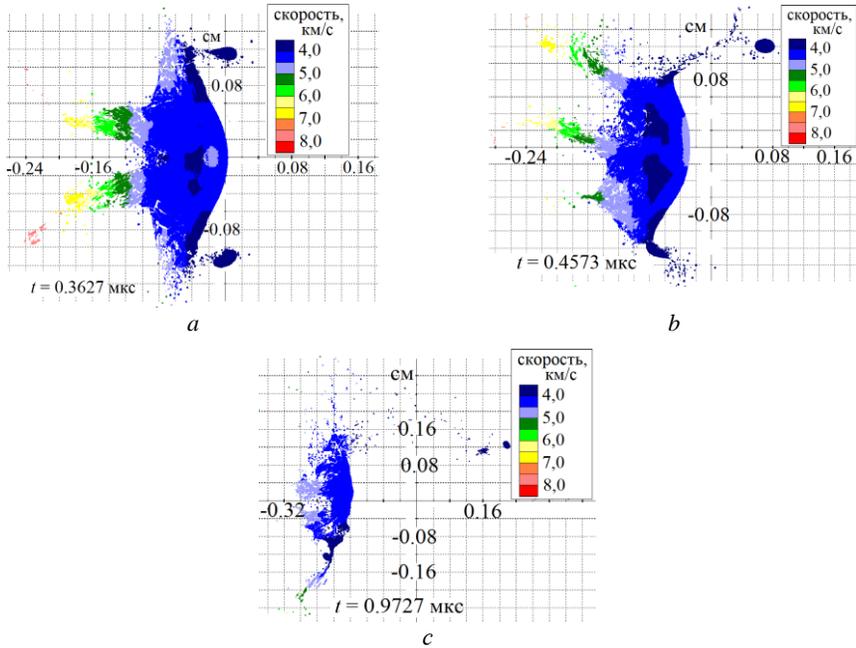


Рис. 6. Результат численного решения для угла гофры:  $a - \alpha = 0^\circ$ ,  $b - \alpha = 30^\circ$ ,  $c - \alpha = 60^\circ$ , в сечении с градацией по скорости

Fig. 6. Numerical solution at corrugation angles:  $\alpha = (a) 0^\circ$ ,  $(b) 30^\circ$ , and  $(c) 60^\circ$ , in a section with speed gradation

Проведено сравнение параметров главного фрагмента запреградного облака продуктов разрушения (ЗОПР) в задачах с ударом в вертикальную проволоку для разных углов наклона гофры при условии одинакового пробега ударника. Будем считать пробегом ударника при проникновении за защитный экран расстояние между проекцией координаты центра масс ударника в начальный и конечный момент расчета на прямую, образованную первоначальной координатой ударника и вектором его скорости, учитывая, что в начальный момент времени ударник вплотную подошел к преграде. За основу в данной работе взят максимальный пробег ударника при проникновении за защитный экран с параметром  $\alpha = 60^\circ$ , который составил 4.3 мм. Выбор экрана с параметром  $\alpha = 60^\circ$  обусловлен фактором ограниченности вычислительных ресурсов, поскольку для экрана с параметром  $\alpha = 75^\circ$  пробег ударника до проникновения за защитный экран составляет 8.35 мм, а время расчета во второй половине задач резко возрастает из-за роста числа вторичных фрагментов. Кроме того, вариант с параметром  $\alpha = 75^\circ$  нецелесообразен ввиду появления значительного отделенного фрагмента (см. рис. 3, f), движущегося параллельно сетке и способного пробить ее на изгибе гофры.

В табл. 4 отражены полученные в результате ЧМ параметры ЗОПР в момент пробега ударника 4.3 мм в каждой задаче. Данное условие соблюдалось из пред-

положения, что габаритный размер защитного экрана, измеренный вдоль нормали к защищаемой стенке, в реальных конструкциях будет ограничен, и было бы логичным во всех задачах ЧМ исходить из равных условий по расстоянию между экраном и стенкой защищаемой конструкции.

Таблица 4

**Основные характеристики заэкранного облака продуктов разрушения при пробеге ударника 4.3 мм при первоначальном контакте в вертикальной проволоке**

Параметр	Угол наклона гофры, град.				
	0	15	30	45	60
$V_{01}$ , км/с	4.008	4.006	3.971	4.030	4.003
$d_{01}$ , мм	1.058	1.012	1.007	1.007	0.923
$W_r$ , Дж	33.748	32.644	29.344	28.824	24.393
$W_{mf}$ , Дж	13.935	12.196	11.951	12.630	9.632
$M_{mf}/M_0$	0.3515	0.3071	0.3029	0.3031	0.2333

*Примечание.*  $V_{01}$  – скорость центра ЗОПР,  $d_{01}$  – диаметр максимального фрагмента,  $W_r$  – суммарная кинетическая энергия продуктов разрушения,  $W_{mf}$  – кинетическая энергия максимального движущегося фрагмента.

Анализ полученных результатов в части параметров ЗОПР показывает, что скорость максимального фрагмента остается примерно равной в задачах с одинаковы углом гофры, разница не превышает 1.5%. Как видно из таблицы, снижение опасности осколочных фрагментов при увеличении угла наклона гофры наблюдается для угла наклона  $\alpha = 60^\circ$ , однако тенденция более плавная, чем в табл. 3, где зафиксированы параметры ударника в момент проникания за экран, различный для каждого угла наклона.

Значение кинетической энергии максимального фрагмента для угла наклона  $\alpha = 60^\circ$  составляет 69% от максимального значения энергии, зафиксированного для угла  $\alpha = 0^\circ$ , а соответственное значение суммарной кинетической энергии ЗОПР составляет 72% от максимального.

Рассмотрены задачи с различными вариантами положения первоначального контакта ударника и сеточной преграды, результаты представлены в табл. 5. Для сравнения характеристик выбраны значения при первоначальном контакте ударника и преграды в вертикальной проволоке.

Таблица 5

**Суммарная кинетическая энергия ЗОПР, Дж при пробеге ударника 4.3 мм при различных вариантах первоначального контакта**

Вариант первоначального контакта	Угол наклона гофры, град.				
	0	15	30	45	60
В центр просвета ячейки	34.025	32.989	29.587	28.243	24.137
В узел	32.254	31.548	29.070	27.939	23.812
В вертикальную проволоку	33.748	32.644	29.344	28.824	24.393
В горизонтальную проволоку		33.096	29.981	29.552	24.389
Расхождение min/max, %	5.20	4.68	3.04	5.46	2.38

Результаты решения задач ЧМ для различного первоначального положения точки контакта ударника и преграды показывают, что расхождение значения кине-

тической энергии в различных вариантах не превышает 5.5% (для угла  $\alpha = 45^\circ$ ), минимальная разница наблюдается для угла  $\alpha = 60^\circ$ . Из полученных результатов следует также, что для задач с углом наклона гофры 0 и  $15^\circ$  заметна градация между обработкой экраном удара «в узел» и «в просвет», но при повышении угла наклона это различие практически исчезает.

Настоящее исследование подтверждает сделанные в работе [10] выводы об улучшении работоспособности защитного экрана при больших углах гофрирования. Среди представленных вариантов экранов наиболее эффективным с точки зрения угла наклона гофры является экран с  $\alpha = 60^\circ$ .

### **Заключение**

Методом численного моделирования в лагранжевой 3D-постановке решен ряд задач высокоскоростного соударения сферического алюминиевого ударника с гофрированной преградой из стальной тканой сетки при различных углах наклона гофры, а также при различных положениях точки первоначального контакта ударника и преграды. Исследованы параметры запреградного облака продуктов разрушения, полученного в результате решения задач ЧМ.

Результаты численного моделирования согласуются с результатами проведенных на аналогичных конструкциях экспериментов. Подтвердилось предположение, что наклонная сеточная преграда эффективнее прямой преграды из сетки (с равной приведенной массой) за счет «эффекта терки», т.е. интенсивного дробления контактирующего края ударника. Определен оптимальный угол наклона гофры сеточного экрана, составляющий  $\alpha = 60^\circ$ , при условии одинакового пробега главного фрагмента осколочного облака в разных задачах. Анализ результатов ЧМ для различных положений точки первоначального контакта ударника с преградой показал, что для выбранных параметров проволоочной сетки и ударника различие положения не играет значительной роли, однако для задач с углом наклона гофры менее  $30^\circ$  экран лучше отрабатывает удар «в узел», чем удар «в просвет», при повышении угла наклона это различие практически исчезает. Кумулятивный эффект при заданной конфигурации ударника и конфигурациях экранов проявляется также только для углов наклона гофры не более  $30^\circ$ , причем наиболее опасной с точки зрения появления локального скопления высокоскоростных фрагментов является конфигурация с углом гофрирования  $0^\circ$ . Полученные выводы могут использоваться при проектировании сеточных экранов для защиты от метеорно-техногенных воздействий.

### **Список источников**

1. *Christiansen E.L., Kerr J.H.* Mesh Double-Bumper Shield: A Low-Weight Alternative for Spacecraft Meteoroid and Orbital Debris Protection // *International Journal of Impact Engineering*. 1993. V. 14. P. 169–180. doi: 10.1016/0734-743X(93)90018-3
2. *Lin M., Pang B.J., Cheng J.* Experimental and Numerical Study on the Mesh Bumper by Hypervelocity Impact // *Advanced Materials Research*. 2012. V. 457–458. P. 108–112. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.457-458.108
3. *Guan G.S., Niu R.T.* Numerical simulation of hypervelocity impact on mesh bumper causing fragmentation and ejection // *Key Engineering Materials*. 2013. V. 525–526. P. 401–404. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.401

4. Guan G.S., Pu D.D., Ha Y. Investigation into Damage of Stainless Steel Mesh/AL Plate Multi-Shock Shield under Hypervelocity AL-Spheres Impact // *Key Engineering Materials*. 2013. V. 525–526. P. 397–400. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.397
5. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. Studying the redistribution of kinetic energy between the morphologically distinct parts of the fragments cloud formed from high-velocity impact fragmentation of an aluminum sphere on a steel mesh // *AIMS Materials Science*. 2019. V. 6 (5). P. 685–696. doi: 10.3934/mat.2019.5.685
6. Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. Исследование эффективности сеточных гофрированных экранов для защиты космических аппаратов от воздействия метеоро-техногенных частиц // *Космические исследования*. 2020. Т. 58, № 2. С. 131–137. doi: 10.31857/S0023420620020028
7. Dobritsa D.B., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. Protective properties of pleated wire mesh shields for spacecraft protection against meteoroids and space debris // *AIP Conference Proceedings*. 2021. V. 2318. Art. 140006. doi: 10.1063/5.0037000
8. Dobritsa D.B., Yashchenko B.Yu., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. About evaluating the durability of corrugated mesh screens for meteoroid protection // *AIP Conference Proceedings*. 2021. V. 2318. Art. 140004. doi: 10.1063/5.0037002
9. Добрица Д.Б., Яценко Б.Ю., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. Экспериментальное исследование стойкости гофрированных сеточных противометеорных экранов // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2021. № 1 (51). С. 24–32. doi: 10.26162/LS.2021.51.1.004
10. Добрица Д.Б., Яценко Б.Ю., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. К вопросу о геометрии гофрирования и ее влиянии на защитные свойства противометеорного экрана из металлической сетки // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2021. № 4 (54). С. 50–55. doi: 10.26162/LS.2021.54.4.008
11. 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 // *International Journal of Impact Engineering*. 2010. V. 37. P. 980–994. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.04.001
12. Физика взрыва : в 2 т. / под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, перераб. М. : Физматлит, 2002. Т. 2. 656 с.
13. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // *Вычислительные методы в гидродинамике* / под ред. С.С. Григоряна, Ю.Д. Шмыглевского. М. : Мир, 1967. С. 212–263.
14. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin : Springer-Verlag, 1999. 246 p.
15. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А., Шабалин И.И., Бабаков В.А., Куропатенко В.Ф., Киселев А.Б., Тришин Ю.А., Садырин А.И., Киселев С.П., Головнев И.Ф. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. 600 с.
16. Гулидов А.И., Шабалин И.И. Численная реализация граничных условий в динамических контактных задачах. Новосибирск, 1987. 37 с. (Препринт ИТПМ СО АН СССР; № 12-87).
17. Гулидов А.И., Шабалин И.И. Расчет контактных границ с учетом трения при динамическом взаимодействии деформируемых тел // *Численные методы решения задач теории упругости и пластичности : материалы IX Всесоюз. конф.* Новосибирск, 1988. С. 70–75.
18. Chen Y.M., Wilkins M.L. Stress analysis of crack problems with a three-dimensional, time dependent computer program // *International Journal of Fracture*. 1976. V. 12 (4). P. 607–617.
19. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного воздействия тел / под ред. А.В. Герасимова. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2007. 572 с.
20. Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate // *Journal of Applied Physics*. 1980. V. 51 (3). P. 1498–1504. doi: 10.1063/1.327799
21. Галанин М.П., Щеглов И.А. Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: прямые методы. М., 2006. 32 с. (Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша; № 10).

## References

1. Christiansen E.L., Kerr J.H. (1993) Mesh double-bumper shield: a low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection. *International Journal of Impact Engineering*. 14. pp. 169–180. doi: 10.1016/0734-743X(93)90018-3
2. Lin M., Pang B.J., Cheng J. (2012) Experimental and numerical study on the mesh bumper by hypervelocity impact. *Advanced Materials Research*. 457–458. pp. 108–112. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.457-458.108
3. Guan G.S., Niu R.T. (2013) Numerical simulation of hypervelocity impact on mesh bumper causing fragmentation and ejection. *Key Engineering Materials*. 525–526. pp. 401–404. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.401
4. Guan G.S., Pu D.D., Ha Y. (2013) Investigation into damage of stainless steel mesh/AL plate multi-shock shield under hypervelocity AL-spheres impact. *Key Engineering Materials*. 525–526. pp. 397–400. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.397
5. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. (2019) Studying the redistribution of kinetic energy between the morphologically distinct parts of the fragments cloud formed from high-velocity impact fragmentation of an aluminum sphere on a steel mesh. *AIMS Materials Science*. 6(5). pp. 685–696. doi: 10.3934/matrsoci.2019.5.685
6. Dobritsa D.B., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. (2020) Study of the efficiency of corrugated mesh shields for spacecraft protection against meteoroids and manmade space debris. *Cosmic Research*. 58(2). pp. 105–110. doi: 10.1134/S0010952520020021
7. Dobritsa D.B., Pashkov S.V., Khristenko Iu.F. (2021) Protective properties of pleated wire mesh shields for spacecraft protection against meteoroids and space debris. *AIP Conference Proceedings*. 2318. Article 140006. doi: 10.1063/5.0037000
8. Dobritsa D.B., Yashchenko B.Yu., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. (2021) About evaluating the durability of corrugated mesh screens for meteoroid protection. *AIP Conference Proceedings*. 2318. Article 140004. doi: 10.1063/5.0037002
9. Dobritsa D.B., Yashchenko B.Yu., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. (2021) Eksperimental'noe issledovanie stoykosti gofrirovannykh setochnykh protivometeornykh ekranov [Experimental study of the resistance of corrugated mesh micrometeoroid/orbital debris shields]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*. 51(1). pp. 24–32. doi: 10.26162/LS.2021.51.1.004
10. Dobritsa D.B., Yashchenko B.Yu., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. (2021) K voprosu o geometrii gofrirovaniya i eyo vliyaniya na zashchitnye svoystva protivometeorogo ekrana iz metallicheskey setki [On the question of the geometry of corrugation and its influence on the protective properties of the metal mesh meteoroid protection shield]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*. 54(4). pp. 50–55. doi: 10.26162/LS.2021.54.4.008
11. Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N. (2010) Experimental and numerical study of peculiarities at high-velocity interaction between a projectile and discrete bumpers. *International Journal of Impact Engineering*. 37. pp. 980–994. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.04.001
12. *Fizika vzryva* [Physics of explosion] (2002) Ed. by Orlenko L.P. Moscow: Fizmatlit.
13. Wilkins M.L. (1964) Calculation of elastic-plastic flow. *Methods of Computational Physics*. 3.
14. Wilkins M.L. (1999) *Computer Simulation of Dynamic Phenomena*. Berlin: Springer-Verlag.
15. Fomin V.M., Gulidov A.I., Sapozhnikov G.A., Shabalin I.I., Babakov V.A., Kuropatenko V.F., Kiselev A.B., Trishin Yu.A., Sadyrin A.I., Kiselev S.P., Golovnev I.F. (1999) *Iyosokoskorostnoe vzaimodeystvie tel* [High-speed interaction of bodies]. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN.
16. Gulidov A.I., Shabalin I.I. (1987) *Chislennaya realizatsiya granichnykh usloviy v dinamicheskikh kontaknykh zadachakh* [Numerical implementation of boundary conditions in dynamic contact problems]. Novosibirsk: Preprint / ITPM SO AN SSSR.
17. Gulidov A.I., Shabalin I.I. (1988) Raschet kontaknykh granits s uchetom treniya pri dinamicheskom vzaimodeystvii deformiruemykh tel [Calculation of contact boundaries with account for friction at a dynamic interaction of deformable bodies]. *Proceedings of the IX All-*

*Union Conference on Numerical Methods for solving the problems of the theory of elasticity and plasticity, Novosibirsk. pp. 70–75.*

18. Chen Y.M., Wilkins M.L. (1976) Stress analysis of crack problems with a three-dimensional, time dependent computer program. *International Journal of Fracture*. 12(4). pp. 607–617. doi: 10.1007/BF00034646
19. *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya vysokoskorostnogo vozdeystviya tel* [Theoretical and experimental studies of high-speed interaction of bodies] (2007) Ed. by Gerasimov A.V. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo Universiteta.
20. Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W. (1980) A constitutive model for metals applicable at high-strain rate. *Journal of Applied Physics*. 51(3). pp. 1498–1504. doi: 10.1063/1.327799
21. Galanin M.P., Sheglov I.A. (2006) Razrabotka i realizatsiya algoritmov trekhmernoy triangulyatsii slozhnykh prostranstvennykh oblastey: pryamye metody [Development and implementation of algorithms for constrained volume triangulations: direct methods]. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha – Keldysh Institute Preprints*. 10. pp. 1–32.

**Сведения об авторах:**

**Добрица Дмитрий Борисович** – кандидат технических наук, ведущий математик отдела «Исследования внешних воздействующих факторов и проектирования защиты от них», АО «НПО им. С.А. Лавочкина», Химки, Россия. E-mail: dobritsaDB@laspace.ru

**Христенко Юрий Федорович** – старший научный сотрудник, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела механики деформируемого твердого тела Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: hrs@niipmm.tsu.ru

**Information about the authors:**

**Dobritsa Dmitry B.** (Candidate of Technical Sciences, Lavochkin Association, Khimki, Russian Federation). E-mail: dobritsaDB@laspace.ru

**Khristenko Yuriy F.** (Doctor of Technical Sciences, Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: hrs@niipmm.tsu.ru

*Статья поступила в редакцию 04.07.2022; принята к публикации 31.03.2023*

*The article was submitted 04.07.2022; accepted for publication 31.03.2023*