

УДК 523.6

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОТИВОМЕТЕОРИТНОЙ ЗАЩИТЫ СОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2024 г. В. В. Ким^{1,*}, С. И. Мартыненко¹, А. В. Острик¹,
член-корреспондент РАН И. В. Ломоносов¹

Поступило 14.12.2023 г.

После доработки 14.12.2023 г.

Принято к публикации 25.12.2023 г.

Описана физическая модель и приведены результаты численных расчетов разрушения защитных экранов космического аппарата под действием удара микрометеорита. Проведено газодинамическое численное моделирование процесса высокоскоростного пробивания микрометеоритом разнесенного защитного экрана космического аппарата, с учетом фрагментации и образования облака фрагментов после прохождения защитного экрана. В трехмерной постановке получены расчетные конфигурации облака осколков ударника и мишени для начальных скоростей ударника до 10 км/с. Показана высокая эффективность используемой конструкции защитного экрана из разнонаправленных гофрированных сеток как средства фрагментации и рассеяния кинетической энергии удара некрупных высокоскоростных частиц, снижающего средний импульс давления на защищаемый аппарат на два-три порядка.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, численное моделирование, разнесенные экраны

DOI: 10.31857/S2686740024030032, EDN: KALDPX

В связи с прогрессом в области космических исследований и технологий проблема взаимодействия тел с космическими скоростями становится все более актуальной [1, 2]. В настоящее время в ближнем космосе присутствует множество неисправных спутников и их фрагментов, которые представляют опасность для функционирующих космических аппаратов, особенно пилотируемых. По расчетам Европейского космического агентства, в околоземном пространстве более 29 000 частиц размером 10 см и более. Каждая из них при столкновении гарантированно уничтожит любой космический аппарат или орбитальную станцию. В данный момент эффективных мер защиты от частиц космического мусора размером более 1 см на низких и средних орбитах практически не существует.

Комплексное изучение физических процессов, происходящих при высокоскоростном ударе, в перспективе позволит усовершенствовать имеющиеся и создать новые конструктивные средства защиты космических аппаратов [3].

Начиная с середины прошлого века [4] для защиты летательных аппаратов от ударов высокоскоростных конденсированных объектов широкое применение получил метод построения многослойной системы из пространственно-разнесенных защитных экранов, которые обеспечивают поглощение большей части энергии удара вне контура защищаемой конструкции в результате разрушения, дефрагментации, плавления и зачастую испарения высокоскоростного конденсированного ударника. Эта удаленная от охраняемого объекта защита состоит из достаточно тонких чередующихся экранов, жестких (плотных) и мягких. Основная задача жесткого экрана — фрагментация ударника на осколки и их рассеяние и отвод от генеральной оси удара. Мягкие экраны служат

¹Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии
Российской академии наук,
Черноголовка, Московская обл., Россия
*E-mail: kim@fcr.ac.ru

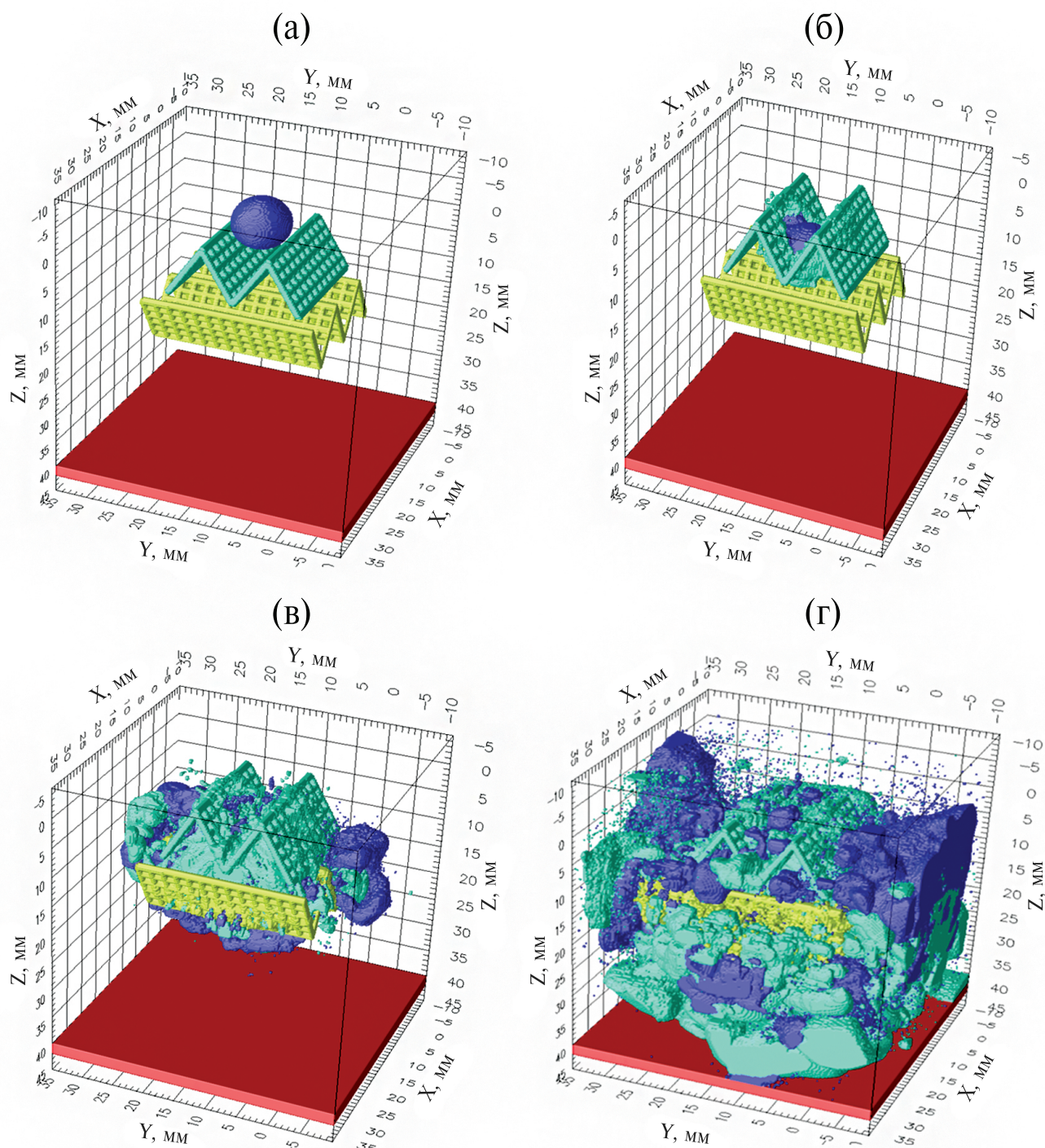


Рис. 1. Конфигурация тел для $v_0 = 10$ км/с в моменты времени $t = 0$ (а), 10 (б), 20 (в) и 30 (г) мкс.

для увеличения площади миделевого сечения облака отклоненных осколков и постепенное поглощение их импульса (вплоть до полной остановки) в ходе процессов схлопывания пор, деформации, разрушения и т.п. При этом

возникает задача поиска оптимальных характеристик экранов: материалов, толщин, расстояний между ними.

Наибольшие успехи в обеспечении начальной фрагментации ударника были достигнуты

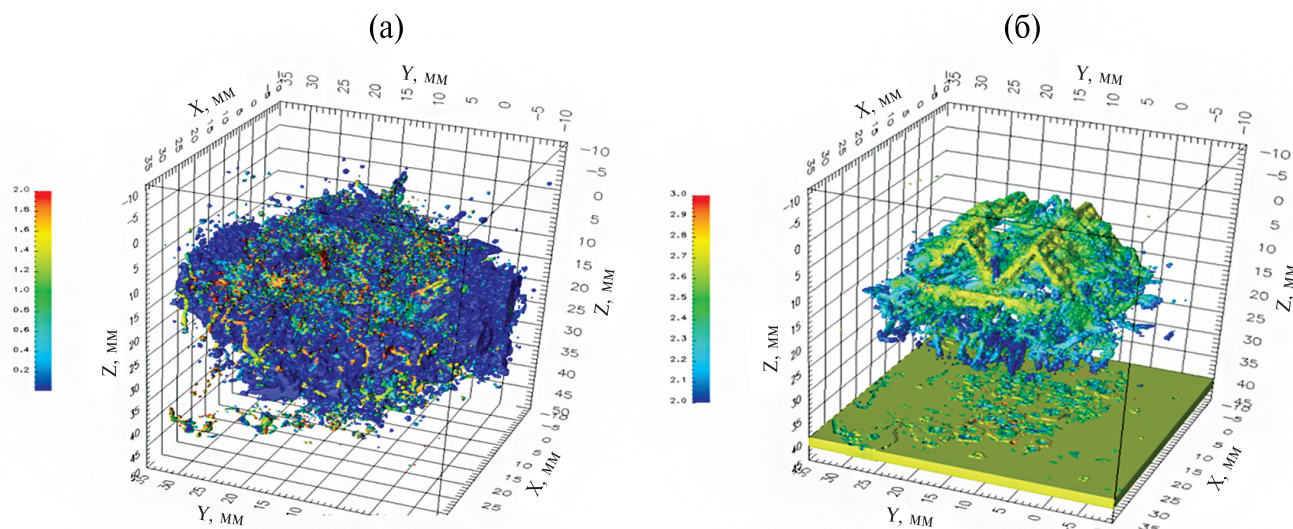


Рис. 2. Две фракции плотности облака фрагментов: в диапазоне значений плотности $\rho = 0.01\text{--}2\text{ г/см}^3$ (а) и $\rho = 2\text{--}3\text{ г/см}^3$ (б).

при использовании во внешних экранах металлических сеток. Современные варианты сеточных экранов опираются на тот известный факт, что наклонная по отношению к направлению удара сетка более эффективно фрагментирует (работает как “терка”) частицу-ударник [5]. Основная идея состоит в применении двух гофрированных сеток, расположенных взаимно перпендикулярно друг к другу (рис. 1). Также были определены оптимальные параметры сеток [5, 6]: ширина складок $(4\text{--}6)d$, высота $(3\text{--}5)d$, что соответствует углу при вершине гофры около 60° .

В настоящей работе для моделирования течения многокомпонентной многофазной сжимаемой среды используется авторский численный метод конечно-размерных частиц в ячейках [7]. Метод относится к смешанным лагранжево-эйлеровым методам и успешно использовался для решения задач физики экстремальных состояний, моделирования высокоскоростного пробивания металлических преград [7], космических импактных экспериментов DeepImpact, LCROSS, 99942 APOPHIS, задач по генерации экстремальных состояний в металлах интенсивными ионными и протонными пучками [8]. Для описания поведения материалов метеорита и защитных экранов используются широкодиапазонные уравнения состояния [9, 10].

В трехмерной постановке моделируется высокоскоростной удар пористого хондритного

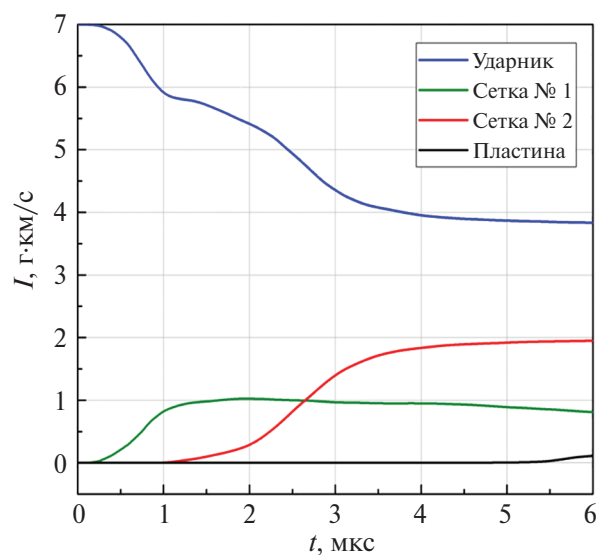


Рис. 3. Динамика передачи перпендикулярной составляющей импульса от ударника к элементам экрана для $V = 7\text{ км/с}$.

микрометеорита ($\rho_0 = 2.7\text{ г/см}^3$) по защитному разнесенному экрану. Сферический ударник массой 1 г (соответствует диаметру шара $d = 8.85\text{ мм}$) нормально соударяется с начальной скоростью $V_0 = 7\text{ км/с}$ и 10 км/с с двухслойной проволочной гофрированной сеткой из алюминия, толщина проволоки 1 мм, угол у вершины гофры $\alpha = 60^\circ$. Гофры слоев сеток взаимно перпендикулярны друг другу. На расстоянии 2 см от второго слоя сетки расположена

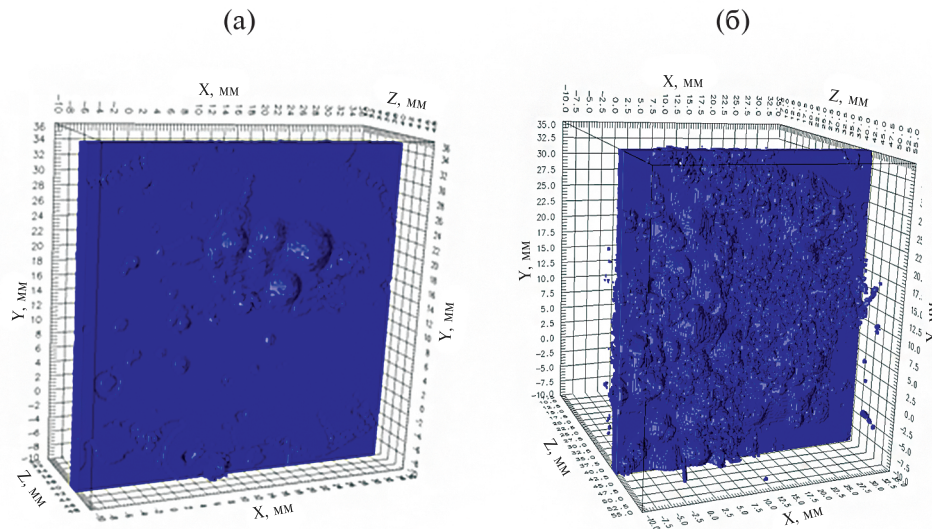


Рис. 4. Тыльные стороны пластин-детекторов для $V = 7$ км/с (а) и 10 км/с (б).

алюминиевая пластина-детектор толщиной 2 мм. На рис. 1а показана начальная постановка численного 3D-эксперимента с цветовым выделением областей разных тел.

На рис. 1 показаны расчетные конфигурации взаимодействующих тел при начальной скорости ударника 10 км/с в моменты времени $t = 0, 10, 20$ и 30 мкс. Из анализа результатов расчета видно, что начиная с момента времени $t = 28$ мкс начинается взаимодействие частиц осколков ударника и защитной сетки с алюминиевой пластиной-детектором. В ходе процесса сеточная конструкция фрагментирует ударник (на рис. 1 показан синим цветом) на отдельные конгломераты осколков, которые продолжают дробиться и рассеиваться далее. Анализ расчетного поля плотности показал, что головная часть облака осколков состоит преимущественно из низкоплотных частиц алюминия и хондрита с $\rho < 2$ г/см³. Так, на рис. 2 представлено расчетное 3D-поле плотности в момент времени $t = 40$ мкс: отдельно для облака низкоплотных осколков с $\rho = 0.01\text{--}2$ г/см³ (рис. 2а) и для диапазона плотностей $\rho = 2\text{--}3$ г/см³ (рис. 2б). Такое распределение плотности в облаке способствует более сглаженной по времени передаче нагрузки на защищаемый объект, чем в случае прямого удара без защитного сеточного экрана.

В качестве интегральной характеристики процесса взаимодействия ударника и элементов экрана рассчитаны нормальные компоненты полного импульса каждого из тел, временные

профили которых приведены на рис. 3 для начальной скорости удара 7 км/с. Как видно из рис. 3, взаимодействие (передача импульса) ударника с первой сеткой в основном завершается к моменту $t = 1$ мкс, при этом ударник фрагментируется и образует облако осколков. Вследствие большей площади взаимодействия эффективность передачи импульса от ударника ко второй сетке более чем в 2 раза выше, чем к первой. Завершается взаимодействие со второй сеткой к моменту времени $t = 4$ мкс. Заметная передача импульса к пластине-детектору начинается с момента времени после $t = 5$ мкс. К этому времени облако осколков уже имеет увеличенные размеры и соответственно меньшую плотность, что снижает возможность пробития преграды.

Заметная передача импульса мишени от ударника и сеток (от них незначительная часть) к пластине-детектору начинается с момента времени $t = 4$ мкс (для начальной скорости $V = 10$ км/с; для варианта с $V = 7$ км/с начало взаимодействия пластины с облаком соответствует более позднему моменту времени). К этому времени облако уже имеет увеличенные размеры и соответственно меньшую плотность, что снижает возможность пробития преграды.

На рис. 4 показаны конфигурации тыльной стороны пластины-детектора на момент времени $t = 6$ мкс. Диаметры пятен повреждения пластин-детекторов осколками составляют $D = 16$ см и $D = 42$ см соответственно. При этом

значения параметра эффективности защиты для $V_0 = 7$ и 10 км/с составляют $K_{eff} = 330$ и 2060 соответственно.

Таким образом, использование гофрированных сеточных экранов позволяет снизить средний воздействующий импульс давления, передаваемый защищаемому объекту на два-три порядка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 21-72-20023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков И.А. Некоторые приоритетные результаты, полученные в области физики в 2019 году (из отчетного доклада академика-секретаря ОФН РАН) // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 492. № 1. С. 4–53.
2. Смирнов И.В., Петров Ю.В. О временных характеристиках разрушения при высокоскоростных испытаниях // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 493. № 1. С. 62–65.
3. Агурейкин В.А., Анисимов С.И., Бушман А.В., Канель Г.И., Карягин В.П., Константинов А.Б., Крюков Б.П., Минин В.Ф., Разоренов С.В., Сагдеев Р.З., Сугак С.Г., Фортон В.Е. Теплофизические и газодинамические проблемы противометеоритной защиты космического аппарата “ВЕГА” // ТВТ. 1984. Т. 22. № 5. С. 964–982.
4. Whipple F.L. Meteorites and space travel // Astronomical Journal. 1947. No. 1161. P. 131.
5. Герасимов А.В., Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. Экран для защиты космического аппарата от высокоскоростного ударного воздействия частиц космической среды // Патент РФ RU 2623782 C1. 2016.
6. Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. Моделирование процесса взаимодействия высокоскоростного ударника с трехслойной разнесенной комбинированной преградой // Космические исследования. 2020. Т. 58. № 2. С. 131–137.
7. Fortov V.E., Kim V.V., Lomonosov I.V., Matveichev A.V., Ostriak A.V. Numerical modeling of hypervelocity impacts // Int. J. Impact Eng. 2006. V. 33(1–12). P. 244.
8. Mintsev V., et.al. Non-Ideal Plasma and Early Experiments at FAIR: HIHEX – Heavy Ion Heating and Expansion // Contrib. Plasma Phys. 2016. V. 56(3–4). P. 281–285.
<https://doi.org/10.1002/ctpp.201500105>
9. Lomonosov I.V. Multi-phase equation of state for aluminum // Laser and Particle Beams. 2007. V. 25. P. 567–584.
10. Ломоносов И.В. Уравнения состояния сапфира, кремнезема, периклаза и рутила // ТВТ. 2023. Т. 61. № 3. С. 473–476.
<https://doi.org/10.31857/S004036442303016X>

THERMOPHYSICAL AND GAS DYNAMICS PROBLEMS OF ANTI-METEORITE PROTECTION FOR MODERN SPACECRAFTS

V. V. Kim^a, S. I. Martynenko^a, A. V. Ostriak^a, Corresponding Member of the RAS I. V. Lomonosov^a

^aFederal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow Region, Russia

The results of numerical calculations of the destruction of the protective shields of the spacecraft under the action of a micrometeorite impact are presented. A gas-dynamic numerical simulation of the process of high-speed penetration by micrometeorite of a spaced protective shield of a spacecraft has been carried out, taking into account fragmentation and the formation of a cloud of fragments after passing through the protective shield. In a three-dimensional formulation, the calculated configurations of the cloud of fragments of the impactor and the target for the initial velocities of the impactor up to 10 km/s are obtained. The high efficiency of the used design of a protective screen made of multidirectional corrugated grids as a means of fragmentation and dispersion of the kinetic energy of impact of small high-speed particles, reducing the average pressure pulse on the protected device by two to three orders of magnitude, is shown.

Keywords: hypervelocity impact, numerical modeling, mesh double-bumper shield