

## **Анализ стойкости защитных конструкций космических аппаратов к высокоскоростному воздействию алюминиевых частиц орбитального мусора**

© В.И. Колпаков, С.В. Федоров, Е.П. Виноградова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

*В настоящее время проблема защиты космических аппаратов от воздействия частиц космического мусора может быть разрешена только с помощью применения защитных экранов, однако из-за массовых и размерных ограничений, накладываемых на космические аппараты, пока не представляется возможным создать такую систему экранной защиты, которая бы полностью устранила метеороидные риски. В статье на основе численного моделирования с использованием программы ANSYS / AUTODYN в рамках двумерных осесимметричных задач механики сплошных сред представлено сравнение эффективности защитных свойств одинаковых по массе однослойного экрана из алюминиевого сплава Al 6061-T6 с двухслойной защитой, состоящей из бампера (экрана) из разных материалов (реакционных, пористых и композиционных), за которым следует зазор, ограниченный задней (основной) алюминиевой стенкой (корпусом). В процессе моделирования уточнены критерии разрушения взаимодействующих материалов и предельные баллистические кривые рассматриваемых преград. Выявлена степень негативного влияния алюминиевого бампера на характер пробития задней алюминиевой стенки двухслойного преграды. Показано, что защитные конструкции с бамперами из реакционных или пористых либо композиционных материалов обладают более высокой стойкостью, чем экраны, имеющие алюминиевые бамперы.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, космический мусор, высокоскоростные компактные и плоские элементы, метеороидная защита, ударное воздействие, численное моделирование, предельная баллистическая кривая

**Введение.** Космические аппараты (КА) подвержены воздействию метеороидов и частиц орбитального мусора, ущерб от которых способен ухудшить их производительность, сократить продолжительность функционирования или привести к катастрофической потере этих объектов, превращая их в космический мусор. Система метеороидной защиты КА предназначена для того, чтобы предотвратить негативное воздействие большинства метеороидов и частиц орбитального мусора, которые могут причинить серьезный ущерб КА или членам его экипажа на протяжении всего срока эксплуатации. Требования к системе защиты, как правило, выражаются в терминах уровня минимально допустимой надежности, т. е. вероятности того, что КА не будет поражен метеороидом или космическим мусором (КМ). При этом уязвимость КА в потоке КМ может быть определена как комбинация вероятностей отказов его различных систем из-за ударов фрагментами КМ, причем с учетом важности (критичности) каждой из

компонент и их дублирования. Количество ударов и их характеристики являются лишь исходной информацией для определения ожидаемых последствий и их влияния на выполнение КА своей целевой функции. При этом требуемая вероятность безотказной работы (работоспособности) критически важных систем КА за время эксплуатации (от нескольких дней до десятка лет), как правило, составляет 0,98–0,998 [1–9].

Вследствие массовых и размерных ограничений, накладываемых на КА, сейчас не представляется возможным создать систему экранной защиты (экранирования), которая бы полностью устраняла метеороидные риски. Система экранирования — важный компонент всего комплекса мер, предусмотренных для снижения риска воздействия частиц КМ. Однако весь комплекс мер по защите КА включает и различные операционные средства, такие как использование средств наблюдения, для обеспечения заблаговременного предупреждения о грозящем столкновении и последующее применение мер защиты критически важных систем КА или совершение маневра уклонения от возможности столкновения. Кроме того, операционная защита предусматривает изменение конструкции КА с возможностью умеренной деградации КА или изменения его функций с целью снижения общего риска для выполнения конкретной полетной миссии. Таким образом, задача конструктора заключается в поиске компромисса между стоимостью реализации и эффективностью конкретного метода защиты КА. В настоящее время проблема защиты КА от воздействия частиц КМ может быть решена только за счет применения защитных экранов.

В 1940 г. Фред Уиппл предложил метеороидный щит для КА, состоящий из тонкого «жертвенного» щита (или экрана) — «бампера», отстоящего на определенном расстоянии от задней стенки [10]. Для Международной космической станции (МКС) задняя стенка имитирует корпус КА, удерживающий атмосферное давление. В зазоре между наружным бампером и задней стенкой находится вакуум (даже для жилых модулей МКС). Функцией бампера является разбиение ударяющей с высокой скоростью частицы метеороида (ударника) в облако более мелких фрагментов, которое содержит наряду с частицами материала ударника фрагменты бампера и интенсивно расширяется во время движения в зазоре. В результате вся энергия и импульс ударника распределяются по довольно широкой области на поверхности задней стенки. Предложенный подход более эффективен, чем одностеночная защита КА, однако его недостаток, в отличие от защиты одиночным щитом, заключается в том, что требуется дополнительный объем.

В работах [7, 8] на примере высокоскоростного ударного взаимодействия алюминиевых шаровидных частиц представлено сравнение эффективности защитных свойств одинаковых по массе монолитного

щита из сплава Al 6061-T6, изготовленного из одной пластины толщиной 4,4 мм, и щита Уиппла из того же материала, состоящего из бампера толщиной 1,2 мм с последующим зазором толщиной 100 мм и задней стенки толщиной 3,2 мм (рис. 1). Для этого использовались так называемые предельные баллистические кривые, связывающие критический диаметр ударника с границей выхода из строя защитных щитов. На рисунке представлены такие кривые для монолитного щита (кривая 1) из сплава Al 6061-T6 (российский аналог АМг6) и двухслойного щита Уиппла (кривая 2) из того же материала, подверженных нормальному удару алюминиевых сферических ударников из Al 6061-T6 со скоростью  $U_x$  в диапазоне 1...15 км/с.

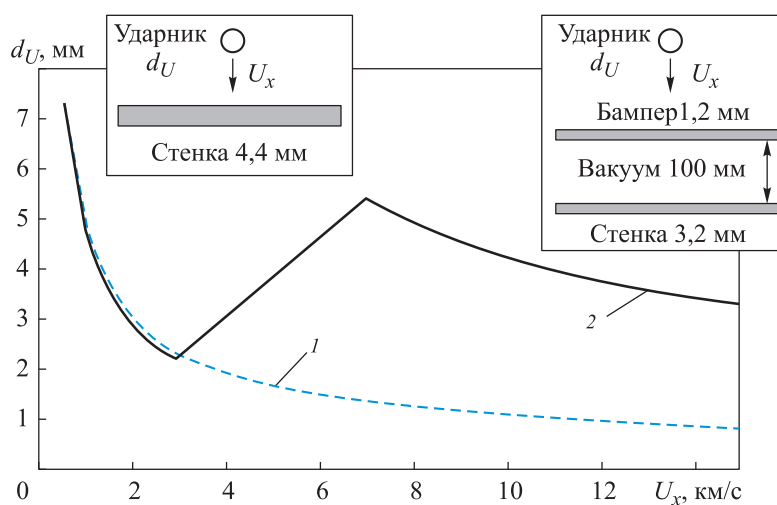


Рис. 1. Базовые баллистические кривые одинаковых по массе монолитного щита из Al 6061-T6 (1) и двухслойного щита Уиппла из того же материала (2)

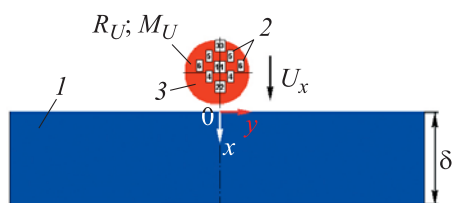
Отказ защитных свойств обоих щитов определялся расчетным путем с использованием специализированной программы CALE [8] при условии сквозного пробития всех пластин. При этом для щита Уиппла выделено три характерных скоростных режима взаимодействия, определяемых нормальной по отношению к поверхности преграды составляющей скорости ударника ( $U_x$ ) и агрегатным состоянием материала ударника — твердым, жидким, газообразным (см. рис. 1): 1 —  $U_x \leq 3$  км/с; 2 —  $3$  км/с  $< U_x \leq 7$  км/с; 3 —  $U_x > 7$  км/с. Первому режиму свойственно проникновение ударника в виде твердого и еще неразрушенного тела, второму — в виде частиц разрушенного или жидкого (расплавленного) тела, третьему — в жидкой или даже газообразной фазе.

Естественно, что предложенный подход не учитывает возможности вызванного откольными эффектами разрушения защитных конструкций без их сквозного пробития [11–14]. Однако возникающий в результате откола на тыльной стороне задней стенки щита Уиппла

высокоскоростной поток частиц также представляет серьезную опасность и может причинить существенный ущерб как самому КА, так и членам его экипажа. Современные исследования, посвященные механизму защиты от гиперскоростных ударов с помощью щитов Уиппла, представлены в [15]. Тем не менее до настоящего времени представляют определенный интерес особенности разрушения подобных конструкций под действием не только сферических ударников, но и пластинчатых тел, а также степень влияния конструктивных параметров первого экрана на эффективность защитных свойств щитов Уиппла в целом.

Цель настоящей работы — уточнение баллистических кривых, характеризующих разрушение двухслойных защит КА с учетом откольных эффектов во взаимодействующих между собой материалах под действием не только сферических ударников, но и пластинчатых тел идентичной массы в виде цилиндрических дисков разной толщины. Оценивалось также влияние параметров первого экрана на эффективность защитных свойств двухслойной защиты КА в целом.

**Предмет и методы исследования.** Высокоскоростное ударное взаимодействие сферических и пластинчатых алюминиевых ударников с однослойной и двухслойной преградами из того же материала было исследовано на основе численного моделирования посредством решения двумерных осесимметричных задач механики сплошных сред в рамках расчетных схем, показанных на рис. 2 и 3.



**Рис. 2.** Расчетная схема ударного взаимодействия сферической частицы ударника, имеющего геометрические и массовые характеристики  $R_U$ ,  $M_U$ , а также скорость  $U_x = 2 \dots 15$  км/с, с однослойной монолитной преградой из сплава Al 6061-T6: 1 — преграда толщиной  $\delta = 4,4$  мм; 2 — ударник из Al 6061-T6; 3 — реперные точки (маркеры)

При численном моделировании взрывных и ударных явлений необходимо учитывать как прочность, так и сжимаемость твердой среды. Для этого наиболее часто применяют модели упругопластической и идеальной упругопластической сред [13–21]. В настоящей работе для лучшего согласования расчетных и экспериментальных данных были использованы обе модели, а именно идеально упругопластическая модель (упругопластическая модель фон Мизеса в терминологии AUTODYN), где применяются постоянные числовые значения предела текучести ( $Y$ ), модуля сдвига ( $G$ ), и модель описания пластического течения Стейнберга — Гуинана (Steinberg — Guinan) [21, 22], учитывающая изменение прочностных параметров ( $Y$ ,  $G$ ) в процессе деформирования.

$$G = G_0 \left[ 1 + \frac{\partial G / \partial P}{G_0} \frac{P}{\delta^{1/3}} + \frac{\partial G / \partial T}{G_0} (T - 300) \right],$$

$$Y = Y_0 \left[ 1 + \frac{\partial Y / \partial P}{Y_0} \frac{P}{\delta^{1/3}} + \frac{\partial Y / \partial T}{Y_0} (T - 300) \right] (1 + \beta \varepsilon_i^p)^n,$$

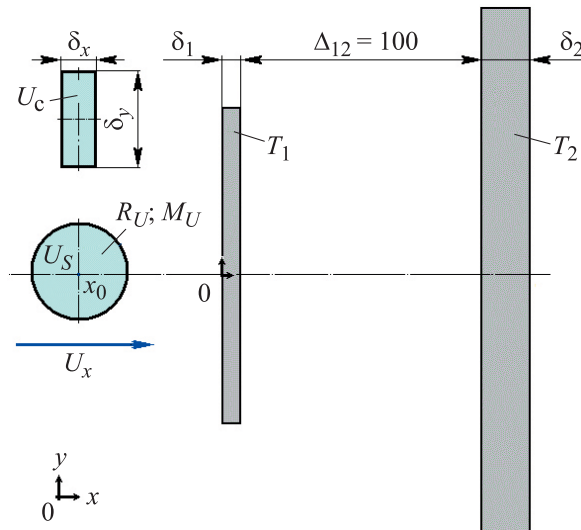
при условии, что

$$Y_0 (1 + \beta \varepsilon_i^p)^n \leq Y_{\max}.$$

В противном случае

$$Y = Y_{\max} \left[ 1 + \frac{\partial Y / \partial P}{Y_0} \frac{P}{\delta^{1/3}} + \frac{\partial Y / \partial T}{Y_0} (T - 300) \right].$$

Здесь  $Y_0$ ,  $Y_{\max}$ ,  $G_0$ ,  $\beta$ ,  $(\partial Y / \partial P)$ ,  $(\partial G / \partial P)$ ,  $(\partial G / \partial T)$  — постоянные, определяемые из условия наилучшего описания опытных данных;  $\varepsilon_i^p$  — интенсивность пластических деформаций;  $\delta = V_0 / V = \rho / \rho_0$  — сжатие материала;  $V_0$ ,  $V$  — начальный и текущий удельные объемы;  $\rho_0$ ,  $\rho$  — начальная и текущая плотность;  $T$  — текущая температура среды, К.



**Рис. 3.** Расчетная схема ударного взаимодействия сферических и цилиндрических частиц с двухслойной преградой:

$U_s$  или  $U_c$  — ударники в виде сферы или цилиндра из алюминиевого сплава Al 6061-T6;  $U_x = 2 \dots 15$  км/с — скорость ударников;  $R_U$ ,  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $M_U$  — геометрические и массовые характеристики ударников;  $T_1$ ,  $T_2$  — бампер и задняя стенка преграды (щита Уиппла) из Al 6061-T6 соответственно;  $\delta_1 = 1,2$  мм,  $\delta_2 = 3,2$  мм,  $\Delta_{12} = 100$  мм — геометрические параметры базовой преграды [8]

Параметры модели Стейнберга — Гуинана (Steinberg — Guinan) для использованных в работе алюминиевых сплавов приведены в таблице.

## Параметры модели Стейнберга — Гуинана

Характеристика	Материал	
	Al-1100 (АД-1)	Al-6061-T6
$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	2,707 (2,71)	2,703
$C_p$ , кДж/(г·К)	8,84e-4	8,85e-4
Модуль сдвига $G$ , ГПа	27,1	27,6
Предел текучести * $Y_0$ , ГПа	0,04 (0,15–0,2)	0,29 (0,24–0,29)
Максимальное значение предела текучести $Y_{max}$ , ГПа	0,48	0,68
Упрочнение $\beta$	400	125
Степень $n$	0,27	0,1
$\partial G/\partial P$	1,767	1,8
$\partial G/\partial T$ , ГПа/К	–0,01669	–0,017
$\partial Y/\partial P$	0,00361	0,01891
Температура плавления $T_m$ , К	1220	1220
Откольная прочность $\sigma$ , ГПа	1,0	1,0–1,2
* В скобках указаны скорректированные по экспериментальным данным значения динамического предела текучести $Y_0$ .		

Для описания разрушения металлических элементов конструкции под действием высокоскоростного удара использовался прочностной критерий вида  $\sigma = \sigma^*$  ( $\sigma$  — среднее напряжение всестороннего растяжения;  $\sigma^*$  — предел прочности на растяжение или откольная прочность) [11, 12].

Известно, что при высокоскоростном ударе в процессе ударного сжатия энтропия взаимодействующих тел возрастает, поэтому в итоге среда оказывается нагретой. Приращение энтропии может оказаться достаточным для изменения структуры вещества, приводящего к изменению его агрегатного состояния, в результате которого происходят плавление, испарение, а также перенос энергии излучением. По данным [14], изменение агрегатного состояния среды можно оценить по формуле

$$U = \sqrt{2e_s},$$

где  $U$  — скорость соударения;  $e_s$  — энергия, потребляемая средой.

Так, для алюминия при скоростях 0,9...1,34 км/с, что соответствует  $e_s = 0,4...0,9$  кДж/г, происходит переход в расплавленное состояние. При скоростях  $U \geq 0,75C_0$  (4,13...4,47 км/с), где  $C_0$  — скорость звука в алюминии,  $C_0 = 5,5$  км/с, что соответствует  $e_s = 8,5...10$  кДж/г, происходит его сублимация, т. е. наблюдается переход вещества

непосредственно из твердого состояния в газовое без прохождения через жидкое состояние.

В пересчете на температуру по формуле

$$T_s = e_s / C_p,$$

где  $C_p = 963$  кДж/(г · К) — теплоемкость алюминия при постоянном давлении, можно оценить температурный диапазон  $T_s$ , соответствующий сублимации алюминиевой среды,

$$T_s = 8860...10\ 384 \text{ К.}$$

По данным работы [23], он несколько ниже, однако превосходит 4700 К. Помимо перечисленных выше показателей в настоящей работе для оценки эффекта сублимации алюминиевых сплавов в области взрывного расширения вещества были использованы критические значения плотности [14]

$$\rho_{кр} = 0,63...0,64 \text{ г/см}^3,$$

ниже которых субстанция считалась испарившейся. Использование последнего критерия особенного удобно при моделировании высокоскоростных ударных процессов с применением широкодиапазонных уравнений состояний, так как не требует специальных мер по удалению испарившихся элементов взаимодействующих между собой сред.

**Верификация расчетных данных.** Конкретные расчеты выполнялись в несколько этапов с помощью программного комплекса ANSYS/AUTODYN [22]. *На первом этапе* осуществлялась верификация разработанного методического и математического аппаратов (рекомендациям по параметрам моделей используемых материалов, расчетным схемам и методам расчета) путем сопоставления результатов расчета и экспериментальных данных. *На втором и третьем этапах* уточнялись предельные баллистические кривые однослойной и двухслойной преград соответственно при взаимодействии со сферическими ударниками. *На четвертом этапе* проводилось построение баллистических кривых, описывающих пробитие двухслойной преграды плоскими цилиндрическими ударниками. Наконец, *на пятом этапе* оценивалось влияния первого экрана на эффективность защитных свойств рассматриваемой двухслойной преграды в целом.

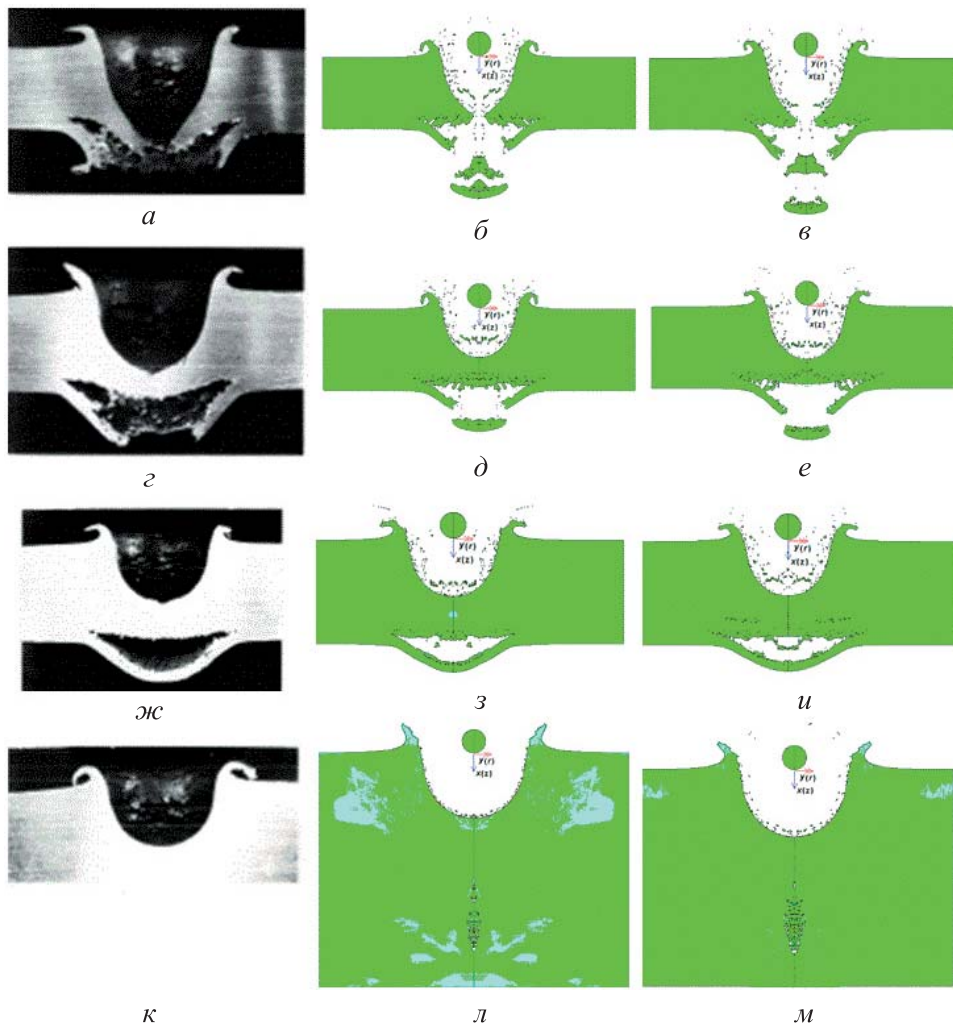
Для тестирования результатов расчетов использовали экспериментальные данные [8] ударного взаимодействия ( $U_x = 5,9$  км/с) шаровидного ударника из натрий-кальций-силикатного стекла с преградой из алюминиевого сплава Al-1100 — российский аналог АД-1 (см. таблицу) разной толщины —  $t = 3d$ ;  $t = 3,4d$ ;  $t = 4d$  и  $t = 10d$ , где  $t$  — толщина преграды,  $d = 9$  мм — диаметр ударника. При этом подбирались

наиболее адекватные модели поведения преграды — модели деформирования и разрушения.

В качестве модели поведения ударника использовалась идеально упругопластическая модель среды ( $G = 24$  ГПа,  $Y_0 = 1,0$  ГПа) с полиномиальным уравнением состояния вида

$$\mu = \rho / \rho_0 - 1 > 0; \quad p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3; \quad \mu = \rho / \rho_0 - 1 \leq 0; \quad p = T_1\mu,$$

где  $\rho_0 = 2,53$  г/см<sup>3</sup>;  $A_1 = K_0 = 45,4$  ГПа;  $A_2 = -138,0$  ГПа;  $A_3 = 250,0$  ГПа;  $T_1 = 45,4$  ГПа. В качестве критерия разрушения принят

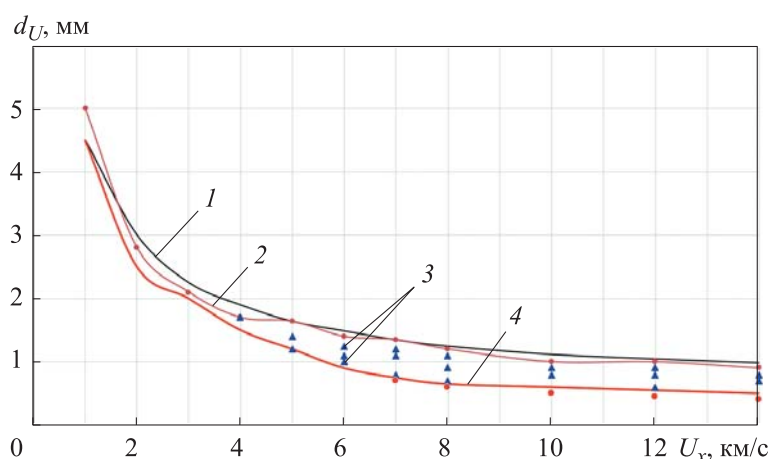


**Рис. 4.** Моделирование ударного взаимодействия ( $U_x = 5,9$  км/с) стеклянного шарика  $d = 9$  мм (0,966 г) с алюминиевыми преградами разной толщины:  
*a, б, в* —  $t = 3,0d = 27$  мм; *г, д, е* —  $t = 3,4d = 30,6$  мм; *ж, з, и* —  $t = 4,0d = 36$  мм; *к, л, м* —  $t = (9...10)d = 81...90$  мм; *a, г, ж, к* — эксперимент; *б, д, з* — Al 1100, модель фон Мизеса,  $Y = 0,35...0,5$  ГПа; *и, л, м* — Al 1100, модель Стейнберга — Гуинана; *в, е* — Al 1061-T6, модель Стейнберга — Гуинана



прочностной критерий предельных средних напряжений всестороннего растяжения, причем  $\sigma^* = 0,1$  ГПа. Результаты выполненных в эйлеровых координатах расчетов для сравнения с экспериментальными данными представлены на рис. 4.

**Уточнение предельных баллистических кривых, характеризующих пробитие однослойной преграды сферическими ударниками.** Результаты выполненного расчетного исследования представлены на рис. 5 в виде баллистических кривых 2, 4 и отдельных точек 3, характеризующих ударное взаимодействие сферических ударников диаметром  $d_U$  из алюминиевого сплава Al 6061-T6 с монолитной пластиной толщиной 4,4 мм из того же материала в диапазоне скоростей  $U_x = 1...14$  км/с. При этом кривая 2 практически точно совпадает с базовой кривой 1 [8] и соответствует сквозному пробитию преграды, а кривая 4 — ударному взаимодействию без сквозного пробития и без откола в преграде. Область между кривыми 2 и 4, отдельные расчетные точки 3 которой отмечены треугольниками (▲), характеризует область откола в преграде. Сквозного пробития в этой области не происходит.



**Рис. 5.** Баллистические кривые, характеризующие пробитие алюминиевой преграды толщиной 4,4 мм алюминиевыми сферическими ударниками: 1 — базовая кривая [8]; 2, 4 — расчетные зависимости, характеризующие сквозное пробитие и непобитие преграды соответственно; 3 — точки (▲), соответствующие отколу на тыльной стороне без сквозного пробития преграды

В дополнение к представленным зависимостям для наглядности на рис. 6 проиллюстрированы изменение характера пробития и степени ущерба алюминиевой пластины толщиной 4,4 мм под действием сферических ударников разного диаметра  $d_U = 0,5...1,0$  мм, движущихся со скоростью 10 км/с. Как видно на представленной иллюстрации, под действием ударников диаметром 0,5...0,6 мм не происходит откола с тыльной стороны преграды, хотя и зарождается

трещина при ударе более крупным ударником (рис. 6, а, б). Под действием ударников диаметром 0,8 мм (рис. 6, в) наблюдается откол в преграде без сквозного пробития. И наконец, пробитие преграды, сопровождающееся интенсивным отколом, реализуется при данной скорости ударниками диаметром 1 мм и выше (рис. 6, г).

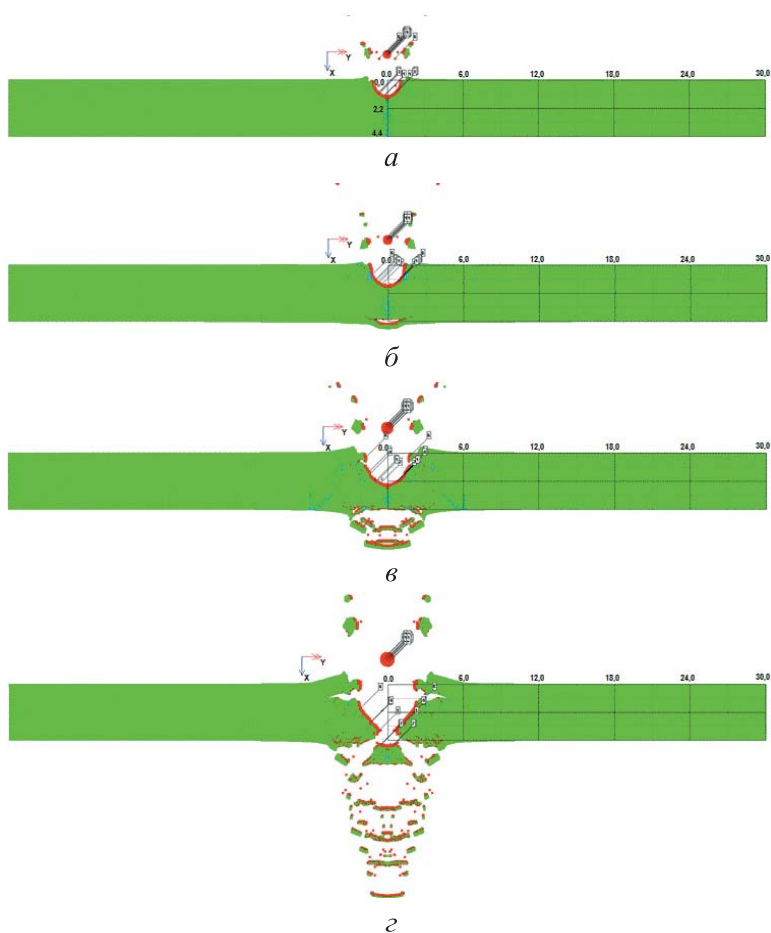
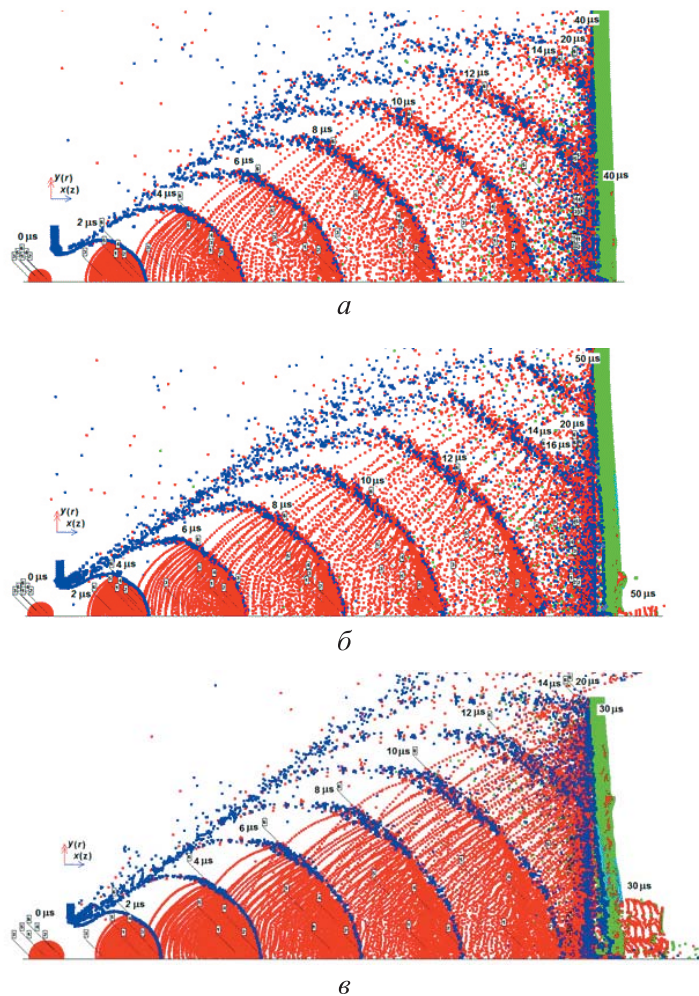


Рис. 6. Пробитие алюминиевой преграды толщиной 4,4 мм сферическими ударниками из того же материала диаметром 0,5 мм (а), 0,6 мм (б), 0,8 мм (в) и 1,0 мм (г), движущимися со скоростью 10 км/с при  $t = 10$  мкс (а, б, в) и  $t = 20$  мкс (г)

**Уточнение предельных баллистических кривых, характеризующих пробитие двухслойной преграды сферическими ударниками.** Примеры расчетов динамики пробития двухслойного щита Уиппла (1,2 мм + 100-мм зазор + 3,2 мм) из Al 6061-T6 сферическими ударниками диаметром 4,0...6,5 мм из того же сплава, движущимися со скоростью 10 км/с, представлены на рис. 7. В этом случае сдерживающий эффект преграды существенно выше. Как видно на приведенной иллюстрации, в рассматриваемом скоростном режиме под действием ударников диаметром 4,0 мм (рис. 7, а) задняя стенка

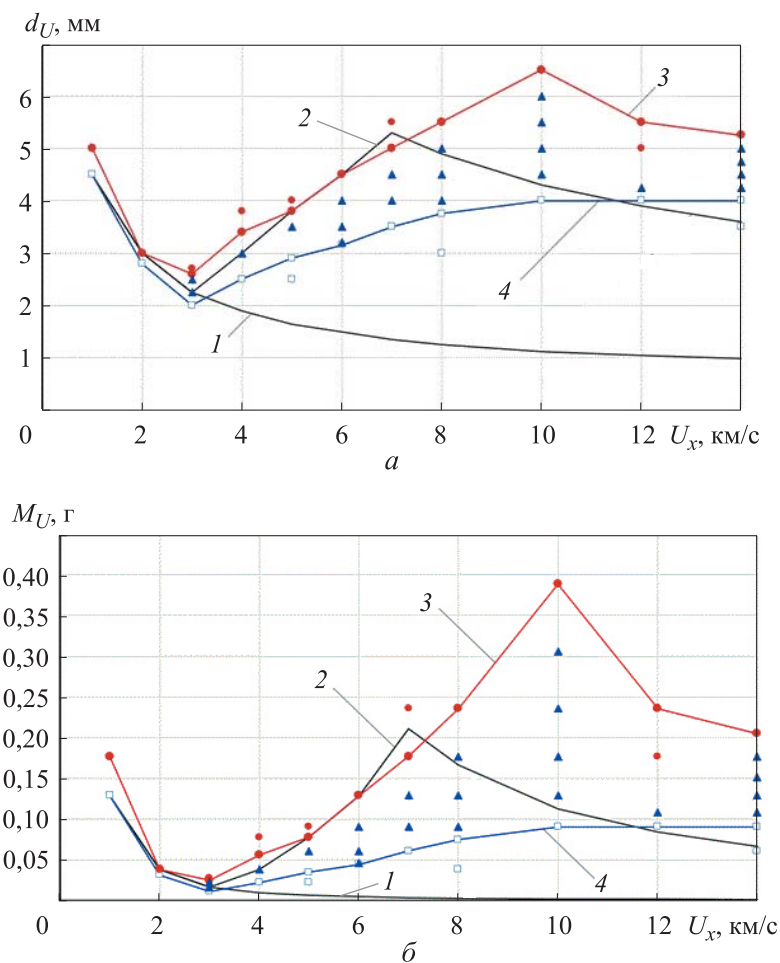
двухслойного щита подвергается незначительному деформированию и остается непробитой. С увеличением диаметра ударника до 4,5 мм (рис. 7, б) при той же скорости на тыльной стороне задней стенки формируется откол. Однако сквозного пробития преграды не происходит, оно наступает только под действием ударников диаметром 6,5 мм и выше (рис. 7, в).



**Рис. 7.** Пробитие двухслойного щита Уиппла (1,2 мм + 100-мм зазор + 3,2 мм) из Al 6061-T6 движущимися со скоростью 10 км/с алюминиевыми сферическими ударниками диаметром 4,0 мм (а), 4,5 мм (б) и 6,5 мм (в)

Итоговые баллистические кривые ( $d_U - U_x$ ) и ( $M_U - U_x$ ), показанные на рис. 8, характеризуют пробитие не только монолитной преграды толщиной 4,4 мм (кривая 1), но и двухслойного щита Уиппла такой же массы (1,2 мм + зазор (100 мм) + 3,2 мм) из Al 6061-T6 (кривые 2, 3, 4) алюминиевыми (Al 6061-T6) сферическими ударниками ( $d_U, M_U$ ) в диапазоне скоростей  $U_x = 1...14$  км/с. На рисунке

кривые 1, 2 — базовые [8], 3, 4 — зависимости, полученные расчетным путем в настоящей работе. Причем кривая 3 соответствует сквозному пробитию преграды, кривая 4 — ударному взаимодействию без сквозного пробития и без откола в задней стенке преграды. Область между кривыми 3 и 4 соответствует отколу в преграде без сквозного пробития. Точки, обозначенные ●, ▲, □, характеризуют соответственно сквозное пробитие задней стенки преграды, откол на тыльной стороне преграды (сквозного пробития не происходит) и ударное взаимодействие без сквозного пробития и без откола в преграде.



**Рис. 8.** Баллистические кривые  $d_U - U_x$  (а) и  $M_U - U_x$  (б), характеризующие пробитие однослойной преграды толщиной 4,4 мм (1) и двухслойного щита Уиппла такой же массы из Al 6061-T6 (2, 3, 4) алюминиевыми (Al 6061-T6) сферическими ударниками ( $d_U, M_U$ ) в диапазоне скоростей  $U_x = 1 \dots 14$  км/с:

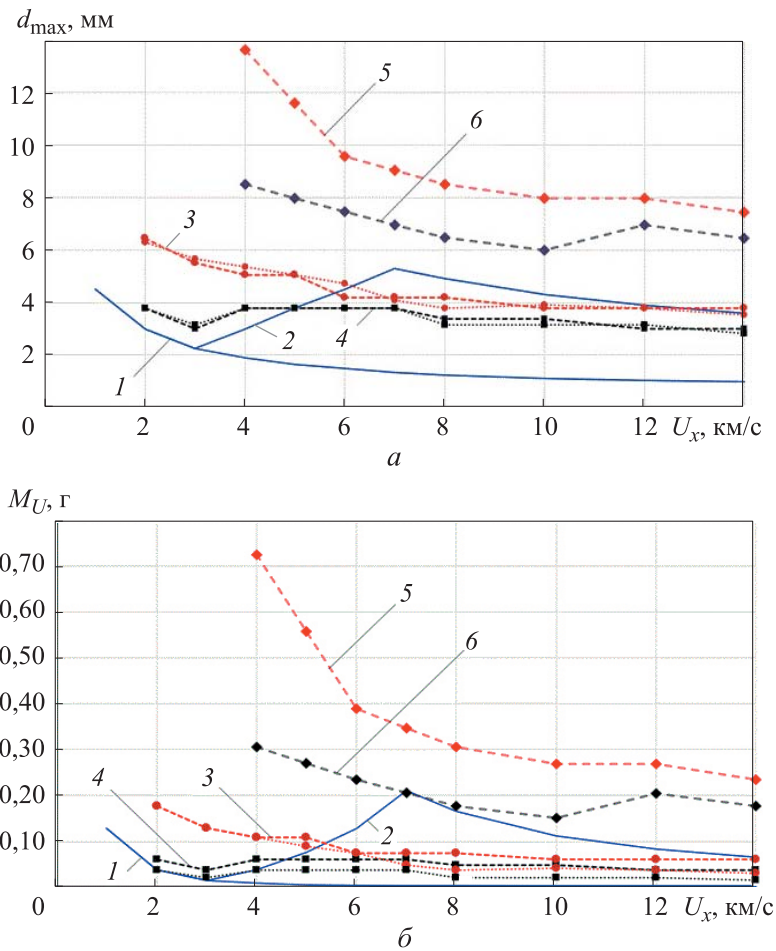
1, 2 — базовые кривые [8]; 3, 4 — расчетные зависимости, соответствующие сквозному пробитию преграды (3) и ударному взаимодействию без сквозного пробития и без откола в задней стенке преграды (4)

Следует отметить, что ранее (в частности, в работе [8]) в качестве границы выхода из строя защитных конструкций использовались кривые, разделяющие между собой рабочую область с областью, в которой потеряна герметичность конструкции (предельные баллистические кривые). В настоящей работе с этой же целью вместо баллистических кривых в зависимости от функционального назначения КА предложено использовать либо область, ограниченную двумя кривыми (см. рис. 8, кривые 3 и 4), разделяющими между собой область сквозного пробития преграды, область откола на тыльной стороне преграды (когда сквозного пробития не происходит и герметичность конструкции сохранена) и, собственно говоря, область безопасной работы, в которой отсутствуют откольные эффекты и не нарушена герметичность конструкции, либо одну из выше описанных кривых — 3 или 4. При этом кривая 3 существенно расширяет область безопасной работы КА, а кривая 4, наоборот, существенно сужает ее.

Необходимо также добавить, что полученные расчетные зависимости 3 и 4 существенно отличаются от базовой кривой 2 (см. рис. 8), особенно в плане оценки степени влияния уязвимости КА высокоскоростных частиц ( $U_x \geq 6 \dots 14$  км/с), что вызвано, видимо, использованием разных расчетных методик — CALE [8] и AUTODYN [22], а также различной математической трактовкой разрушения взаимодействующих между собой материалов (при построении кривой 2 разрушения материалов не учитывалось, а при построении кривых 3 и 4 в качестве критерия разрушения принят прочностной критерий предельных средних напряжений всестороннего растяжения, лимитируемых откольной прочностью). Кроме того, как видно на рис. 7, существенное негативное влияние на характер пробития задней стенки двухслойной преграды оказывают параметры первого («жертвенного») щита (материал, толщина). При этом, как будет показано ниже, это влияние тем существеннее, чем выше скорость ударника, и кроме того, оно в значительной степени зависит от формы ударника.

**Построение баллистических кривых, описывающих пробитие двухслойной преграды плоскими цилиндрическими ударниками.** Для оценки влияния формы ударников на уязвимость защиты КА было проведено сравнение нормального высокоскоростного удара сферических ударников с нормальным ударом идентичных по массе плоских цилиндрических ударников, толщина которых для рассматриваемой разнесенной преграды (1,2 мм + (100-мм) + 3,2 мм) из Al 6061-T6 варьировалась в диапазоне  $\delta_x = 0,4 \dots 2,8$  мм (см. рис. 2). Баллистические кривые  $d_{\max} - U_x$  и  $M_U - U_x$ , характеризующие пробитие однослойной преграды и двухслойного щита Уиппла, для сравнения приведены на рис. 9. Графики, представленные на рис. 9, позволяют сделать вывод, что нормальный высокоскоростной удар плоских

цилиндрических ударников в рассматриваемом диапазоне толщин гораздо опаснее воздействия сферических ударников, особенно при скоростях выше 4...5 км/с. В этом случае меньший по массе цилиндрический ударник за счет дополнительно присоединенной массы бампера способен при одинаковой скорости эффективнее пробивать заднюю стенку двухслойной преграды, чем более массивный сферический ударник.



**Рис. 9.** Баллистические кривые  $d_{max} - U_x$  (а) и  $M_U - U_x$  (б), характеризующие пробитие однослойной преграды толщиной 4,4 мм (1) и двухслойного щита Уиппла такой же массы из Al 6061-T6 сферическими ударниками (1, 2) и плоскими ( $\delta_x = 0,4...2,8$  мм) цилиндрическими ударниками из того же материала (3, 4, 5, 6) в диапазоне скоростей  $U_x = 1...14$  км/с:

1, 2 — базовые кривые для сферических ударников [8]; 3, 4 — расчетные зависимости для цилиндрических ударников, соответствующие сквозному пробитию разнесенной преграды с алюминиевым бампером (3) и ударному взаимодействию без сквозного пробития и без откола в задней стенке преграды (4); 5, 6 — аналогичные расчетные зависимости для разнесенной преграды со сгорающим бампером из реакционного материала, соответствующие сквозному пробитию преграды (5) и ударному взаимодействию без сквозного пробития и без откола в задней стенке преграды (6)

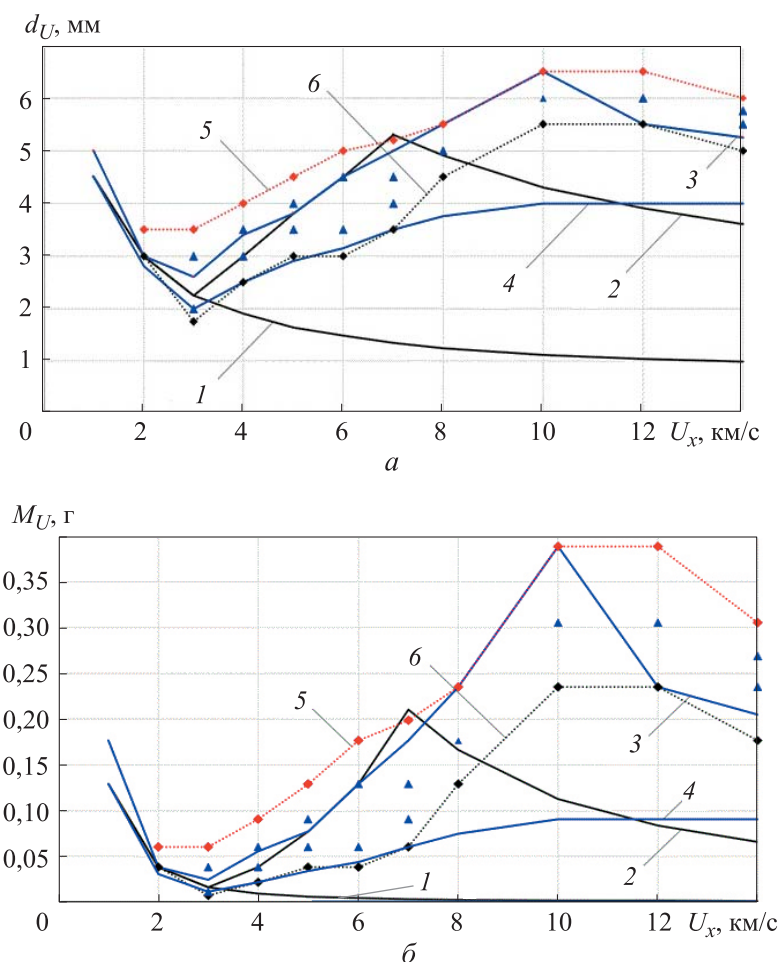
Однако при скоростях менее 4 км/с наблюдалась обратная картина, определяемая сменой механизмов разрушения бампера. Если при относительно низкой скорости ударника (менее 3...4 км/с) разрушение бампера происходит преимущественно по типу «выбивания пробки» [14, 16], то при скорости более 4 км/с доминирующую роль играют прочностные эффекты, определяемые откольной прочностью взаимодействующих материалов.

Таким образом, степень негативного влияния алюминиевого бампера на характер пробития задней стенки двухслойной преграды во многом определяется площадью контакта с ударником. В случае нормального удара плоских цилиндрических ударников она оказывается существенно выше, чем при действии идентичных по массе сферических ударников. Наконец, если тем или иным способом исключить действие присоединенной к ударнику массы бампера по задней (основной) стенке разнесенной преграды, то можно значительно улучшить ее (преграды) защитные свойства (см. рис. 9, кривые 5 и 6). При этом кривая 5 соответствует сквозному пробитию преграды, а кривая 6 — ударному взаимодействию без сквозного пробития и без откола в задней стенке преграды. Возможными способами реализации такого подхода является либо применение так называемых реакционных материалов (РМ) [24], возбуждаемых под действием высокоскоростного удара и сгораемых в вакууме во время движения к задней стенке преграды (см. рис. 3), либо изготовление бамперов из пористых или композиционных материалов [25]. В настоящей работе эффекты, нейтрализующие действие переднего бампера, учитывались простым удалением его частиц из зоны соударения с задней стенкой.

**Оценка влияния первого экрана на эффективность защитных свойств двухслойной преграды.** Для сравнения на рис. 10 представлены защитные свойства двухслойных преград с бампером из сгораемого реакционного материала и из алюминиевого сплава Al 6061-T6 [8] по отношению к нормальному высокоскоростному ударному воздействию компактных ударников сферической формы. В этом случае, как и при нормальном ударе плоских цилиндрических ударников, использование бамперов из химически активных, пористых или композиционных материалов способствует повышению защитных свойств двухслойной преграды, причем более высокие защитные свойства проявляются при скоростях ударников свыше 7 км/с, и эффект будет тем существеннее, чем выше скорость ударника (это показывает сравнение кривых 3 с кривыми 5 и кривых 4 с кривыми 6).

С изложенных позиций предлагается применять бамперы либо из сгораемых после удара химически активных РМ [24], либо из пористых или композиционных материалов [25], тем самым исключив их негативное воздействие на задние (основные) защитные стенки КА.

Эффект от такого конструктивного решения представлен кривыми 5 и 6 на рис. 9 и 10. При этом кривые 5 соответствуют сквозному пробитию преграды, а кривые 6 — ударному взаимодействию без сквозного пробития и без откола в задней стенке преграды.



**Рис. 10.** Защитные свойства щитов Уиппла, использующих бамперы из разных материалов (Al 6061-T6 и сгораемого реакционного материала), по отношению к воздействию алюминиевых (Al 6061-T6) сферических ударников ( $d_U$ ,  $M_U$ ) в диапазоне скоростей  $U_x = 1 \dots 14$  км/с:

1, 2 — базовые баллистические кривые  $d_U - U_x$  (а) или  $M_U - U_x$  (б) соответственно монолитной преграды толщиной 4,4 мм (1) и разнесенной преграды (1,2 мм + (100 мм) + 3,2 мм) из Al 6061-T6 (2) [8]; 3, 4 — расчетные зависимости для разнесенной преграды с алюминиевым бампером (кривая 3 соответствует сквозному пробитию преграды, кривая 4 — ударному взаимодействию без сквозного пробития и без откола в задней стенке преграды); 5, 6 — аналогичные расчетные зависимости для разнесенной преграды со сгорающим бампером из реакционного материала (кривая 5 соответствует сквозному пробитию преграды, кривая 6 — ударному взаимодействию без сквозного пробития и без откола в задней стенке преграды)



Сравнивая кривые 3 с кривыми 5 и кривые 4 с кривыми 6 (см. рис. 9 и 10), необходимо также отметить, что защитные свойства двухслойной преграды с бампером из РМ существенно выше, чем у аналогичной преграды с алюминиевым бампером. Например, при ударе плоскими цилиндрическими ударниками первая из них (с РМ) при скорости 10 км/с сдерживает ударники массой 0,16...0,18 г, а вторая (с бампером из Al 6061-T6) — только массой 0,05...0,06 г (см. рис. 9, б). Еще более высокая эффективность достигается при большей скорости —  $U_x = 12...14$  км/с. Поэтому условно можно считать, что в рассмотренных условиях ( $U_x \geq 10$  км/с) сдерживающий эффект возрос более чем в 3 раза. При нормальном ударе компактных сферических ударников положительный эффект несколько ниже (это показывает сравнение кривых 4 с кривыми 6 на рис. 10), что объясняется меньшей площадью контакта ударника с преградой. Однако его можно повысить, увеличив расстояние между бампером и задней стенкой (см.  $\Delta_{12}$  на рис. 3).

**Заключение.** Таким образом, на модельных примерах численного решения двумерных осесимметричных задач механики сплошных сред, выполненного с использованием программы ANSYS/AUTODYN, представлено сравнение эффективности защитных свойств одинаковых по массе однослойной защиты, выполненной из алюминиевого сплава Al 6061-T6 (российский аналог АМг6), с двухслойной защитой, представляющей собой бампер (экран) из разнообразных материалов, включая реакционные, пористые и композиционные, с последующим зазором с задней (основной) алюминиевой стенкой (корпусом). В процессе моделирования выполнено уточнение предельных баллистических кривых, характеризующих разрушение двухслойных защит космических аппаратов с учетом откольных эффектов в материалах, взаимодействующих между собой, под действием не только сферических ударников, но и пластинчатых тел идентичной массы в виде цилиндрических дисков разной толщины. При этом вместо одной баллистической кривой, в зависимости от функционального назначения космического аппарата, предложено использовать две кривые, разделяющие между собой область сквозного пробития преграды и область откола на тыльной стороне преграды, когда сквозного пробития не происходит и герметичность конструкции будет сохранена. При этом первая из них существенно расширяет область безопасной работы космического аппарата, а вторая, наоборот, существенно сужает ее. Кроме того, выявлена степень негативного влияния алюминиевого бампера на характер пробития задней алюминиевой стенки двухслойного преграды и показана более высокая стойкость защитных конструкций, в которых используются бамперы из реакционных материалов, возбуждаемых под действием высокоскоростного удара и сгорающих в вакууме во время движения к задней стенке преграды, или пористых и композиционных материалов,

по сравнению с конструкциями, в которых использованы алюминиевые бамперы.

Разработанное при этом методическое обеспечение (физико-математические модели взаимодействующих материалов, совокупность расчетных схем и численных методов реализации расчетов), а также принципы усиления многослойных защит (исключение либо минимизация последствий ударного воздействия частиц вышележащего разрушенного защитного элемента на нижележащие элементы) целесообразно использовать при проектировании космических аппаратов различного назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вениаминов С.С., Червонов А.М. *Космический мусор — угроза человечеству*. Москва, ИКИ РАН, 2012, 192 с.
- [2] Шустов Б.М. О фундаментальных исследованиях по проблеме космического мусора. *Всероссийская научная конференция с международным участием «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы»*. Москва, ИКИ РАН, 2019, с. 7–14.
- [3] Назаренко А.И. *Моделирование космического мусора*. Москва, ИКИ РАН, 2013, 216 с.
- [4] Новиков Л.С. *Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты*. Москва, Университетская книга, 2009, 104 с.
- [5] Зеленцов В.В. Проблемы мелкого космического мусора. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 4, с. 89–104. DOI: 10.7463/0415.0764904
- [6] Зеленцов В.В. Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 6, с. 123–142. DOI: 10.7463/0615.0778339
- [7] Christiansen E.L. *Meteoroid / Debris Shielding*. NASA TP-2003-210788 Johnson Space Center, Houston, Texas (USA), 2003, 99 p.
- [8] Christiansen E.L. *Handbook for Designing MMOD Protection*. NASA JSC-64399 (Version A) Johnson Space Center, Houston, Texas (USA), 2009, 135 p.
- [9] Christiansen E.L. Design and performances equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [10] Whipple F.L. Meteorites and space travel. *Astron J.*, 1947, vol. 52, pp. 132–137.
- [11] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортгов В.Е. *Ударно-волновые явления в конденсированных средах*. Москва, «Янус-К», 1996, 408 с.
- [12] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортгов В.Е. *Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах*. Москва, Физматлит, 2008, 248 с.
- [13] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2-х т. Т. 2. Изд. 3-е, испр. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [14] Фомин В.М., ред. *Высокоскоростное взаимодействие тел*. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1999, 600 с.
- [15] Wen K., Chen X.-w., Lu Y.-g. Research and development on hypervelocity impact protection using Whipple shield: An overview. *Defence Technology*, 2021, vol. 17, pp. 1864–1886.

- [16] Герасимов А.В., ред. *Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент*. Томск, Изд-во НТЛ, 2016, 568 с.
- [17] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, John Wiley & Sons Inc., 1989, 389 p.
- [18] Колпаков В.И. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 2, с. 1–36. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html>
- [19] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Численные методы в задачах физики быстропотекающих процессов*. 3-е изд. испр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, 370 с.
- [20] Silnikov M.V., Guk I.V., Nechunaev A.F., Smirnov N.N. Numerical simulation of hypervelocity impact problem for spacecraft shielding elements. *Acta Astronautica*, 2018, vol. 150, pp. 56–62.
- [21] Жерноклетов М.В., ред. *Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках: Монография*. 2-е изд. доп. и испр. Саров, ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», 2005, 428 с.
- [22] *AUTODYN theory manual revision*. Century Dynamics Inc. California, USA, 2005, 235 p.
- [23] Фортов В.Е., ред. *Ударные волны и экстремальные состояния вещества*. Москва, Наука, 2000, 425 с.
- [24] Малкин А.И., Занозин В.М., Кононенко М.М., Топоров Ю.П., Шумихин Т.А., Цивадзе А.Ю. Новая концепция защиты космических аппаратов от микрометеороидов и орбитального мусора. *Доклады Академии наук*, 2011, т. 436, № 4, с. 470–473.
- [25] Бурылов Л.С., Копыл Н.И., Обьедков М.Л., Пепелин В.С., Абашкин Б.И., Буслов Е.П., Семенов В.И., Фельдштейн В.А. *Защитный экран космического аппарата от ударов техногенных частиц и метеороидов*. Патент России RU 2591127 C2 (Заявка 2014135762/11, 03.09.2014), 2016, бюл. 19, 6 с.

Статья поступила в редакцию 15.03.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Колпаков В.И., Федоров С.В., Виноградова Е.П. Анализ стойкости защитных конструкций космических аппаратов к высокоскоростному воздействию алюминиевых частиц орбитального мусора. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2024-3-2344>

**Колпаков Владимир Иванович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 200 научных работ в области физики взрыва и технологии ракетно-космического машиностроения. e-mail: [kolpakovv@bmstu.ru](mailto:kolpakovv@bmstu.ru)

**Фёдоров Сергей Владимирович** — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 300 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара. e-mail: [fedorovsv@bmstu.ru](mailto:fedorovsv@bmstu.ru)

**Виноградова Екатерина Павловна** — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор 7 научных работ в области технологии ракетно-космического машиностроения. e-mail: [vinogradovaapl@student.bmstu.ru](mailto:vinogradovaapl@student.bmstu.ru)

## **Analysis of the spacecraft protective structures resistance to high-speed impact of the orbital debris aluminum particles**

© V.I. Kolpakov, S.V. Fedorov, E.P. Vinogradova

Bauman Moscow State Technical University,  
Moscow, 105005, Russian Federation

*Today, the problem of protecting spacecraft from the impact of the space debris particles could only be solved through introduction of the protective shields. However, due to the mass and size restrictions imposed on a spacecraft, it is currently impossible to create a shield protection system that would completely eliminate the meteoroid risks. This work is based on numerical simulation using the ANSYS/AUTODYN program within the framework of two-dimensional axisymmetric problems of continuum mechanics. It presents a comparative effectiveness assessment of protective properties of the identical in mass single-layer protection made of aluminum alloy Al 6061-T6 and the two-layer protection representing a bumper (shield) made of variety of materials including reactive, porous and composite materials with a gap and a rear (main) aluminum wall (casing). The simulation process refined the interacting materials destruction criteria and the limiting ballistic curves of the considered barriers. Moreover, the aluminum bumper negative influence degree on the penetration nature of the rear aluminum wall of a two-layer barrier was revealed, and higher durability of protective structures using bumpers made of reaction or porous and composite materials was shown, compared to structures using the aluminum bumpers.*

**Keywords:** spacecraft, space debris, high-speed compact and flat elements, meteoroid protection, impact, numerical simulation, limiting ballistic curve

### REFERENCES

- [1] Veniaminov S.S., Chervonov A.M. *Kosmicheskij musor — ugroza chelovechestvu* [Space debris is a threat to humanity]. Moscow, IKI RAN Publ., 2012, 192 p.
- [2] Shustov B.M. O fundamentalnykh issledovaniyakh po probleme kosmicheskogo musora [On fundamental research on the problem of space debris]. In: *Vse-rossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Kosmicheskij musor: fundamentalnye i prakticheskie aspekty ugrozy* [All-Russian scientific conference with international participation "Space debris: fundamental and practical aspects of the threat"]. Moscow, IKI RAN Publ., 2019, pp. 7–14.
- [3] Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* [Space debris simulation]. Moscow, IKI RAN Publ., 2013, 216 p.
- [4] Novikov L.S. *Vozdeystvie tverdykh chastits estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty* [Impact of particulate matter of natural and artificial origin on the spacecraft]. Moscow, Universitetskaya Kniga Publ., 2009, 104 p.
- [5] Zelentsov V.V. Problemy melkogo kosmicheskogo musora [Problems of small debris]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education. Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2015, no. 4, pp. 89–104. <https://doi.org/10.7463/0415.0764904>
- [6] Zelentsov V.V. Zashchita kosmicheskogo apparata ot vozdeystviya fragmentov melkogo kosmicheskogo musora [Protecting spacecraft fragments from exposure to small debris]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tehnicheskoe*

- izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education. Scientific Edition of Bauman MSTU, 2015, no. 6, pp. 123–142.  
<https://doi.org/10.7463/0615.0778339>
- [7] Christiansen E.L. *Meteoroid/Debris Shielding*. NASA TP-2003-210788 Johnson Space Center, Houston, Texas (USA), 2003, 99 p.
- [8] Christiansen E.L. *Handbook for Designing MMOD Protection*. NASA JSC-64399 (Version A) Johnson Space Center, Houston, Texas (USA), 2009, 135 p.
- [9] Christiansen E.L. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [10] Whipple FL. Meteorites and space travel. *Astron J.*, 1947, vol. 52, pp. 132–137.
- [11] Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. *Udarno-volnovye yavleniya v kondensirovannykh sredakh* [Shock wave phenomena in condensed media]. Moscow, Janus-K Publ., 1996, 408 p.
- [12] Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. *Eksperimentalnye profili udarnykh voln v kondensirovannykh veshchestvakh* [Experimental profiles of shock waves in the condensed matter]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008, 248 p.
- [13] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. In 2 vols. Vol. 2. 3<sup>rd</sup> ed., rev. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 656 p.
- [14] Fomin V.M., ed. *Vysokoskorostnoe vzaimodeystvie tel* [High-speed interaction between bodies]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 1999, 600 p.
- [15] Wen K., Chen X.-w., Lu Y.-g. Research and development on hypervelocity impact protection using Whipple shield: An overview. *Defense Technology*, 2021, vol. 17, pp. 1864–1886.
- [16] Gerasimov A.V., ed. *Vysokoskorostnoy udar. Modelirovanie i eksperiment* [High-speed impact. Simulation and experiment]. Tomsk, NTL Publ., 2016, 568 p.
- [17] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, John Wiley & Sons Inc., 1989, 389 p.
- [18] Kolpakov V.I. Matematicheskoe modelirovanie funktsionirovaniya vzryvnykh ustroystv [Mathematical simulation of the explosive devices' performance]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education. Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2012, no. 2, pp. 1–36. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html>
- [19] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroptekayushchikh protsessov* [Numerical methods in problems of physics of fast processes]. 3<sup>rd</sup> ed., rev. Moscow, BMSTU Publ., 2021, 370 p.
- [20] Silnikov M.V., Guk I.V., Nechunaev A.F., Smirnov N.N. Numerical simulation of hypervelocity impact problem for spacecraft shielding elements. *Acta Astronautica*, 2018, vol. 150, pp. 56–62.
- [21] Zhernokletov M.V., ed. *Metody issledovaniya svoystv materialov pri intensivnykh dinamicheskikh nagruzkakh: Monografiya*. [Methods for studying the properties of materials under intense dynamic loads: Monograph]. 2<sup>nd</sup> ed. enl. and rev. Sarov, FGUP “RFYaTs–VNIIEF”, 2005, 428 p.
- [22] *AUTODYN theory manual revision*. Century Dynamics Inc. California, USA, 2005, 235 p.
- [23] Fortov V.E., ed. *Udarnyye volny i ekstremalnye sostoyaniya veshchestva* [Shock waves and extreme states of matter]. Moscow, Nauka Publ., 2000, 425 p.
- [24] Malkin A.I., Zanozin V.M., Kononenko M.M., Toporov Yu.P., Shumikhin T.A., Tsivadze A.Yu. Novaya kontseptsiya zashchity kosmicheskikh apparatov ot mikrometeoroidov i orbitalnogo musora [New concept for protecting spacecraft from micrometeoroids and orbital debris]. *Doklady Akademii nauk*, 2011, vol. 436, no. 4, pp. 470–473.

- [25] Burylov L.S., Kopyl N.I., Obyedkov M.L., Pepelin V.S., Abashkin B.I., Buslov E.P., Semenov V.I., Feldshtein V.A. *Zashchitnyi ekran kosmicheskogo apparata ot udarov tekhnogennykh chastits i meteoroidov* [Spacecraft protective shield from impacts of technogenic particles and meteoroids]. Patent of Russia RU 2591127 C2 (Application 2014135762/11, September 3, 2014), 2016, bull. 19, 6 p.

**Kolpakov V.I.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 200 scientific papers in of explosion physics, rocket and space engineering technology. e-mail: kolpakovv@bmstu.ru

**Fedorov S.V.**, Senior Lecturer, Department of High-Precision Aircraft, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 300 scientific papers in explosion physics and high-velocity impact physics. e-mail: fedorovsv@bmstu.ru

**Vinogradova E.P.**, Postgraduate, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University; author of 7 scientific works in rocket and space engineering technology. e-mail: vinogradovaap1@student.bmstu.ru