

05.3;06.4

Возможности экранной защиты космических объектов от удлиненного ударника со скоростью 7–11 км/с

© Б.В. Румянцев¹, И.В. Гук², А.И. Козачук¹, А.И. Михайлин², С.И. Павлов¹, М.В. Сильников²¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия² ОАО „НПО „Спецматериалы“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: brum@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 24 декабря 2020 г.

В окончательной редакции 24 декабря 2020 г.

Принято к публикации 8 января 2021 г.

Исследуется поражение преграды из дюрала при воздействии алюминиевой струи (аналог фрагмента техногенного мусора) со скоростью 7–11 км/с при наличии металлических экранов из меди и алюминия. Выделена доля эффективности экранной защиты, определяемая разлетом частей разрушенного ударника между экранами. Определено повышение эффективности экранной защиты за счет фазовых переходов взаимодействующих материалов ударника и экрана.

Ключевые слова: экранная защита, техногенный мусор, плавление, испарение.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.08.50846.18672

Действие экранной защиты (ЭЗ) космических аппаратов [1] основано на предварительном разрушении и рассеивании высокоскоростного компактного ударника между экранами и преградой. В случае алюминиевого ударника эффективность ЭЗ возрастает с увеличением скорости ударника до 7 км/с [2], что обеспечивает полное разрушение компактного ударника при взаимодействии с экранами. Фрагменты ударника с радиальной составляющей от оси удара рассеиваются в межэкранный пространство, поглощаются экранами и исключаются из воздействия на преграду (космический аппарат). При дальнейшем повышении скорости компактного ударника (7–10 км/с) отмечалось различие в характере повреждений преграды при сохранении баллистического предела из-за плавления ударника [3].

В настоящей работе исследуются факторы, влияющие на эффективность двухэкранный защиты с фиксированными поверхностной плотностью экрана $8,9 \text{ kg/m}^2$ и расстоянием 2 см между экранами и преградой (рис. 1) от ударника удлиненной формы при скоростях, характерных для космического мусора в околоземном космическом пространстве.

Для формирования удлиненного ударника в работе применялись кумулятивные заряды (КЗ) 1 с массой взрывчатого вещества 40 г, содержащие металлическую воронку 2 с полным углом при вершине A от 60 до 20° , толщиной 0,08 см и диаметром в основании 2 см. Кумулятивные заряды позволяли получать металлические струи (МС) со скоростями до 11 км/с, которые приняты аналогами удлиненных ударников. В отличие от широко распространенных КЗ с медной облицовкой [4,5] в работе применялись КЗ с воронкой из алюминиевого сплава. С использованием преграды 4 из дюрала АМГ6 (рис. 1) моделировалось взаимодействие фрагмента космического мусора с ЭЗ космического аппарата. Протяженная преграда полного поглощения МС позволяла зафиксиро-

вать остаточную энергию и последствия взаимодействия ударника с экранами, а также предельные параметры поражения.

Далее анализируются результаты с экранами из дюрала АМГ6 [2] и меди, так как в работах [6,7] было показано, что защитная способность ЭЗ растет при

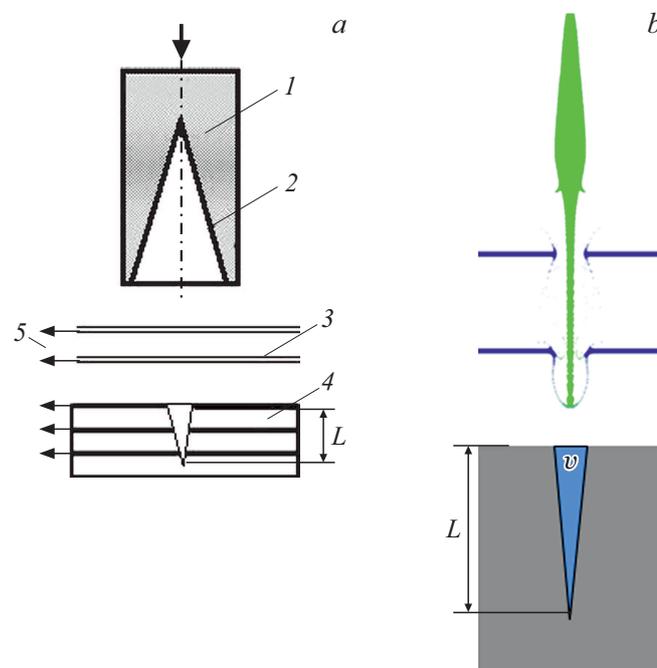


Рис. 1. *a* — схема эксперимента. 1 — кумулятивный заряд, 2 — металлическая воронка, 3 — экраны, 4 — преграда, 5 — контактные датчики измерения времени. Промежутки между зарядом, экранами и преградой составляли 0,02 м, давление воздуха 1 кПа. *b* — численное моделирование пробития экранов и схема каверны в преграде. Параметры поражения: глубина (L) и объем (v) каверны.

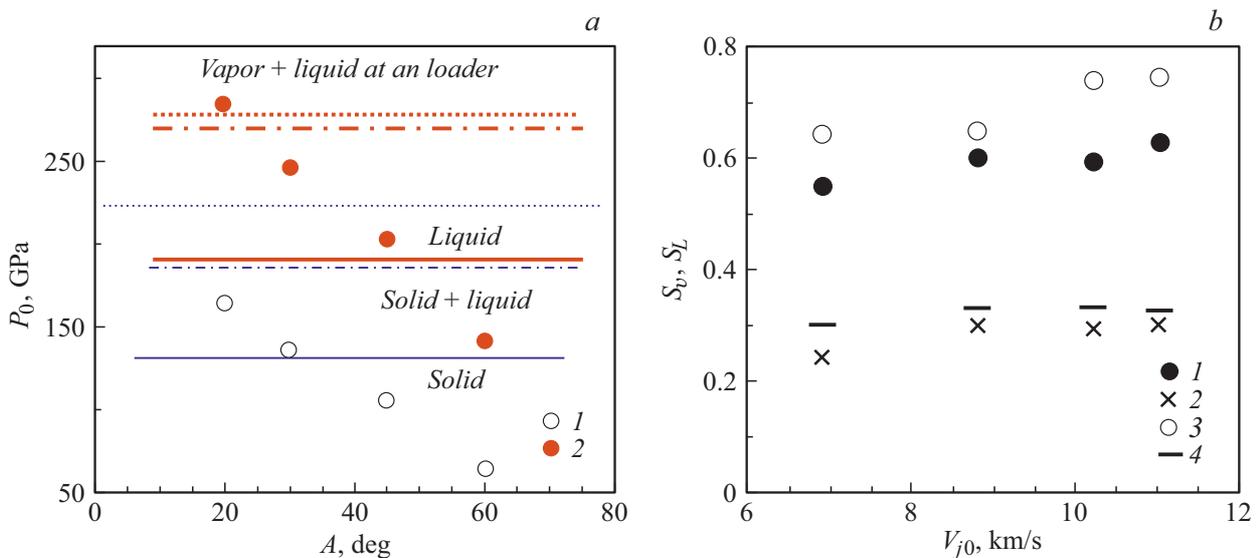


Рис. 2. *a* — начальные давления взаимодействия алюминиевых струй, сформированных КЗ с разными углами A : 1 — с преградой из дюраля (P_{0Al-Al}), 2 — с преградой из меди (P_{0Al-Cu}). Тонкие линии — разделения фазового состояния в дюрале АМГ6, жирные — в меди. *b* — относительное снижение объема (1, 3) и глубины (2, 4) каверны в преграде после двух экранов: из дюраля (1, 2) и меди (3, 4).

Параметры алюминиевых струй и каверны в преграде АМГ6 в зависимости от угла A конической воронки из АМГ6 кумулятивного заряда

A , deg	V_{j0} , km/s	L , cm	v , cm ³	d_j , cm	P_{0Al-Al} , GPa	P_{0Al-Cu} , GPa
20	11.6	11.2	14	0.07	163	285
30	10.2	11.3	11	0.07	135	246
45	8.8	10	9.6	0.08	104	202
60	6.9	9.5	7.6	0.09	88	140

Примечание. V_{j0} — скорость головной части кумулятивной струи, L и v — глубина и объем каверны в преграде без экранной защиты, d_j — средний диаметр кумулятивной струи.

испарении взаимодействующих материалов ударника и экрана. В частности, для ударно-сжатой меди испарение наступает при разгрузке от давления на ударной адиабате более 270 GPa [8]. Аналогичное увеличение защитной способности должно наблюдаться и для алюминиевой струи, если в области взаимодействия будут достигнуты давления на ударной адиабате алюминия порядка 220 GPa [9]. При изоэнтропической разгрузке области взаимодействия часть ударно-сжатого жидкого алюминия будет испаряться.

Кроме того, в работе [10] отмечалось, что при скорости внедрения > 9 km/s алюминиевой струи в алюминиевую преграду наблюдаются последствия дестабилизации внедрения начальной скорости МС, связанной с плавлением алюминия на начальной стадии внедрения.

В таблице приведены экспериментальные значения V_{j0} начальной скорости S , а также параметры поражения (глубина пробития L и объем v каверны) в преграде из

дюраля АМГ6 при различных углах алюминиевой воронки в отсутствие экранов (рис. 1). Дополнительно в таблице отображены начальные давления взаимодействия алюминиевой струи с дюралевой (P_{0Al-Al}) и медной (P_{0Al-Cu}) преградами. Начальные давления в зоне взаимодействия определялись методом торможения [4,11] по пересечению ударной адиабаты экрана (преграды) и отраженной ударной адиабаты алюминиевого ударника.

На рис. 2, *a* представлены уровни давлений, отвечающие границам области плавления на ударной адиабате и значениям, при которых разгрузка ударно-сжатой жидкости приводит к взрывному испарению. Из сопоставления с начальным давлением взаимодействия ударника с экраном (преградой) видно, что кумулятивные струи с разными экранами могут реализовывать на начальной стадии взаимодействия фазовые переходы: плавление алюминия струи и экрана, плавление и испарение части медного экрана. Фазовые переходы с увеличением удельного объема будут оказывать дестабилизирующее влияние на дальнейшее внедрение МС в преграду [10,12].

В настоящей работе по изменению параметров поражения преграды после ЭЗ в зависимости от начальной скорости удлиненного ударника (МС) предпринята попытка:

- определить эффективность действия экранной защиты за счет механического разрушения, диспергирования и рассеивания части удлиненного ударника в межэкранном пространстве;

- выделить влияние фазовых переходов, возникающих при взаимодействии высокоскоростного ударника с экраном, на поражение преграды.

Эффективность ЭЗ оценивалась по относительному снижению параметров поражения преграды по глубине

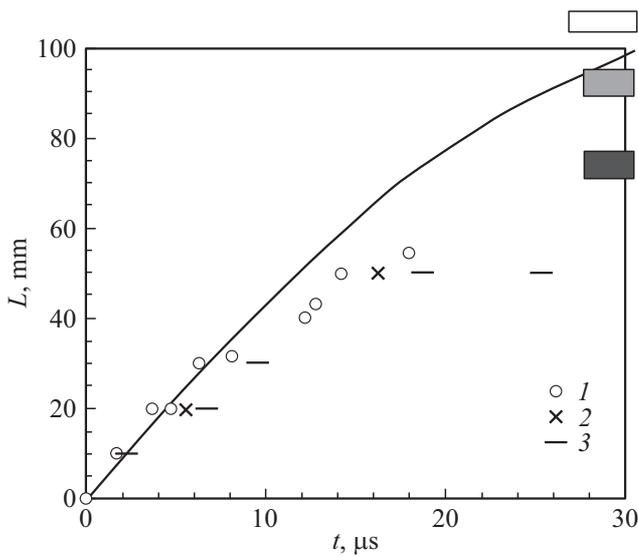


Рис. 3. Траектории внедрения кумулятивной струи от КЗ с $A = 30^\circ$ после экранов в преграду АМГ6. Символы — измеренные времена внедрения в преграду: без экранов (1), с экранами из дюраля (2) и меди (3). Прямоугольники расположены на уровне конечного пробития: светлый — при отсутствии экранов, темный — при наличии медных экранов, серый — с равной поверхностной плотностью экранов из дюраля.

(S_L) и объему (S_v):

$$S_L = 1 - L_+/L, \quad S_v = 1 - v_+/v,$$

где L_+ и v_+ — глубина и объем каверны в преграде при наличии экранов, L и v — глубина и объем каверны в преграде при отсутствии экранов.

На рис. 2, *b* приведены экспериментальные данные по относительному снижению параметров поражения преграды 4 (см. рис. 1) с экранами из дюраля АМГ6 или меди МТ1. Видно, что для ЭЗ из дюраля характерно малое изменение эффективности за счет диспергирования и рассеивания между экранами по мере увеличения скорости удлиненного ударника в диапазоне 7–11 км/с. Наблюдаемое увеличение эффективности ЭЗ с медными экранами на 10–15% связано с испарением меди и алюминия в зоне взаимодействия ударника и экрана при начальной скорости > 9 км/с. Влияние плавления слабо проявляется ввиду незначительного изменения удельного объема взаимодействующих материалов.

Измерения траектории внедрения удлиненного ударника (алюминиевой струи) в преграду после ЭЗ (рис. 3) показывают, что взаимодействие с экранами не сводится только к исключению фрагментов ударника при указанном взаимодействии. Скачкообразный характер внедрения в преграду [6] по сравнению с внедрением при отсутствии экранов свидетельствует о дестабилизации МС от локального взаимодействия с экранами.

Увеличение эффективности ЭЗ наблюдается при скоростях, когда в области взаимодействия ударник–экран

реализуются давления фазовых переходов. Необходимым условием также является превышение времени пролета удлиненного ударника через экран над временем схлопывания расширяющихся материалов фазовых превращений ударника и экрана (см. рис. 1, *b*). Обратная радиальная реакция в виде импульса схлопывающихся материалов возмущает последующие участки удлиненного ударника, дестабилизируя дальнейшее его внедрение в преграду.

Таким образом, при постановке эксперимента, моделирующего поражение осколком техногенного „мусора“ преграды, защищенной экранами, определены:

— уровень снижения параметров поражения за счет разрушения и рассеивания удлиненного ударника на двухэкранный защите (для экранов из дюраля АМГ6 уровень снижения составляет $\sim 30\%$ по глубине и $\sim 60\%$ по объему относительно поражения преграды без экранной защиты);

— увеличение эффективности экранной защиты за счет частичного испарения ударника и медного экрана, которое при скоростях столкновения более 9 км/с составляет 10–15%.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-08-00487/18.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F. Whipple, *Astron. J.*, **52** (1161), 131 (1947).
- [2] IADC-04-03 v. 7. *Protection manual* (2014).
- [3] A.J. Piekutowski, K.L. Poormon, *Procedia Eng.*, **58**, 642 (2013). DOI: 10.1016/j.proeng.2013.05.074
- [4] *Физика взрыва*, под ред. Л.П. Орленко (Физматлит, М., 2002), т. 2.
- [5] C. Wang, J. Ding, H. Zhao, *Defence Sci. J.*, **65** (4), 279 (2015). DOI: 10.14429/dsj.65.8648
- [6] B.V. Rummyantsev, I.V. Guk, A.I. Kozachuk, A.I. Mikhaylin, S.I. Pavlov, M.V. Silnikov, *Acta Astron.*, **163** (Pt A), 73 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.065>
- [7] B.V. Rummyantsev, A.I. Mikhaylin, *Acta Astron.*, **109**, 166 (2015). DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.11.040
- [8] В.Е. Фортгов, И.В. Ломоносов, *УФН*, **184** (3), 231 (2014).
- [9] Д.В. Минаков, *Расчет термодинамических свойств плотной плазмы металлов методом функционала плотности и квантовой молекулярной динамики*, Канд. дис. (ОИВТ РАН, М., 2015), с. 96.
- [10] <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/>
- [11] Б.В. Румянцев, И.В. Гук, А.И. Козачук, А.И. Михайлин, С.И. Павлов, М.В. Сильников, *Письма в ЖТФ*, **46** (9), 25 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49368.18229
- [12] Б.В. Румянцев, С.И. Павлов, *Письма в ЖТФ*, **46** (17), 10 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.17.49885.18363