УДК 531.58
DOI 10.17223/19988621/36/8

Б.Т. Добрица, Д.Б. Добрица

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ С ДВОЙНОЙ СЕТКОЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ

Рассматриваются результаты экспериментального и теоретического исследования работоспособности защитных экранов с двойной сеткой при воздействии высокоскоростных частиц. Экспериментальные работы с использованием пороховых и легкогазовых баллистических установок проводились для испытания нескольких вариантов защитных экранов, предназначенных для защиты топливного бака космического корабля от воздействия высокоскоростных метеорно-техногенных частиц. Рассмотрены баллистические предельные зависимости для сеточных экранов, показавших в результате существенно большую эффективность по сравнению с эквивалентным (по массе) щитом Уиппла (экраном с двойной стенкой).

Ключевые слова: *космический аппарат, метеорно-техногенные тела, легкогазовая установка, щит Уиппла, сеточный экран, баллистическая предельная зависимость, высокоскоростное соударение.*

Одним из факторов, определяющих надежность функционирования космических аппаратов (КА) и их узлов в условиях космического полета, является защита от воздействия метеорно-техногенных тел (МТТ), которые ударяются о внешние элементы конструкции КА со скоростями до нескольких десятков километров в секунду. Техногенные и микрометеорные тела представляют собой реальную и весьма серьезную угрозу для безопасности и функциональных возможностей КА.

Необходимость защиты элементов КА, критичных к воздействию МТТ, и параметры такой защиты определяются следующими факторами:

- назначение КА;
- особенности конструкции КА, его целевой аппаратуры и устанавливаемых агрегатов и систем;
- параметры орбиты КА и траектории перелета;
- заданный срок активного существования КА;
- особенности метеорно-техногенной обстановки в околоспутниковой зоне в процессе функционирования КА.

При решении задачи защиты внешних элементов КА от воздействия МТТ необходимо учитывать особенности конструкции внешних элементов создаваемого аппарата, состояние их после воздействия и признаки механического повреждения, ухудшающие эксплуатационные характеристики элементов.

В работе [1] обобщаются результаты исследований НАСА сеточных экранов с двойным бампером, как одна из концепций защитных экранов низкого веса. Как показали экспериментальные исследования, экраны такой конструкции продемонстрировали экономию массы для диапазона скоростей легкогазовых установок (ЛГУ) по сравнению с обычным щитом Уиппла, представляющим собой две пластины из алюминиевого листа, внешняя из которых по отношению к налетающей частице служит защитным экраном, приблизительно 30–50 % при нормальном уг-

ле воздействия (при угле наклона воздействия 45° достигалась еще большая экономия массы экрана, приблизительно 70 %, при сохранении его работоспособности).

Данный тип защитного экрана с двойным бампером (MDB) был сконструирован путем добавления сетки с мелким просветом перед стандартным щитом Уиппла и вставки слоя ткани высокой прочности между вторым бампером и задней стенкой. По результатам испытаний были разработаны формулы, которые позволяют инженеру-конструктору определить размеры элементов экрана применительно к космическому кораблю.

В работе [1, с. 178] приведены баллистические предельные уравнения, определяющие работоспособность щита MDB. Уравнения даются в форме, которая связывает критический диаметр частицы d со скоростью воздействия v , углом воздействия, плотностью частицы и параметрами мишени. Воздействия частицы большей критического размера приводят к пробоем защиты (по факту это перфорация или отделение осколка на задней стенке щита), в то время как частицы меньшего размера не приводят к пробоем.

Подобные уравнения задают работоспособность защитной конструкции с учетом полного спектра условий воздействия, ожидаемых на орбите, и используются в исследованиях вероятности пробоя при воздействии МТТ с помощью специальных программ.

Для $V \geq 6.4/(\cos \theta)^{1/3}$:

$$d_c = 0.6(t_w \rho_w)^{1/3} \rho_p^{-1/3} V^{-1/3} (\cos \theta)^{-1/3} S^{1/2} (\sigma/40)^{1/6}. \quad (1)$$

Для $2.8/(\cos \theta)^{0.5} < V < 6.4/(\cos \theta)^{1/3}$:

$$\begin{aligned} d_c = & 1.11 \rho_p^{-0.5} \left[t_w (\sigma/40)^{0.5} + 0.37(m_b + m_l) \right] (\cos \theta)^{-4/3} \times \\ & \times \left[\left(6.4/(\cos \theta)^{1/3} - V \right) / \left(6.4/(\cos \theta)^{1/3} - 2.8/(\cos \theta)^{0.5} \right) \right] + \\ & + 0.323(t_w \rho_w)^{1/3} \rho_p^{-1/3} (\cos \theta)^{-2/9} S^{1/2} (\sigma/40)^{1/6} \times \\ & \times \left[\left(V - 2.8/(\cos \theta)^{0.5} \right) / \left(6.4/(\cos \theta)^{1/3} - 2.8/(\cos \theta)^{0.5} \right) \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

Для $V < 2.8/(\cos \theta)^{0.5}$:

$$d_c = 2.2 \left[t_w (\sigma/40)^{0.5} + 0.37(m_b + m_l) \right] / \left[(\cos \theta)^{5/3} \rho_p^{0.5} V^{2/3} \right]. \quad (3)$$

Здесь:

- d_c – диаметр снаряда, вызывающий пробой защищаемой стенки (см),
- ρ – плотность (г/см³),
- m – поверхностная плотность (г/см²),
- S – полный интервал между внешним бампером и задней стенкой (см),
- σ – допустимая прочность на разрыв задней стенки (ksi),
- t – толщина (см),
- θ – угол воздействия, измеренный от поверхности, нормальной (градус),
- V – скорость снаряда (км/с);
- индексы:
- b – бамперы (первый и второй бампер в сеточном экране двойного бампера),

I – средний слой ткани в щите MDB,

p – снаряд,

w – задняя стенка.

На рис. 1 представлена построенная с использованием формул (1) – (3) баллистическая предельная зависимость (БПЗ) для типовой конфигурации экрана с двойным сеточным бампером [1, с. 179] совместно с экспериментальными точками. Общая поверхностная плотность экрана составляет 0.32 г/см^2 (при поверхностной плотности, входящей в конструкцию задней стенки из сплава Al2024T1, равной 0.142 г/см^2). Расстояние между задней стенкой и внешним бампером составляет 10.16 см.

Рис. 1. Баллистическая предельная зависимость для щита с двойным сеточным бампером и эквивалентного щита Уиппла

БПЗ экрана с двойным сеточным бампером изображена совместно с БПЗ обычного «щита Уиппла» с эквивалентной поверхностной плотностью для наглядного сравнения работоспособности этих конструкций. Обе кривые строились для нормального угла подлета. Для расчета работоспособности типового щита Уиппла использовались уравнения Кристиансена и Керр для расчета двойной стенки [2, с. 97].

Исследованию проблемы защиты космических аппаратов от столкновения их с метеорными и техногенными частицами посвящена работа [3], в которой проводилось численное моделирование и экспериментальное определение предельной стойкости элементов конструкции КА «Спектр-УФ». В экспериментах и при численном моделировании рассматривался образец, представляющий собой реальный фрагмент бака астрофизического спутника «Спектр-УФ» с установленной противометеорной защитой. Эксперименты проводились с алюминиевыми шариками диаметром 1.5–2.5 мм при скоростях соударения 2.03–3.95 км/с. Защитная пластина имела толщину 1.7 мм, стенка бака – 1.9 мм, расстояние между ними – 38 мм, оба элемента образца – алюминиевые (конструкция щита Уиппла).

Сеточный экран с двойным бампером в качестве одного из объектов исследования тестировался в научно-исследовательской работе, выполненной НИИ ПММ ТГУ по заказу НПО им. Лавочкина [4]. В рамках этой работы проводились эксперименты по высокоскоростному соударению элементов конструкций космического аппарата с использованием пороховых и легкогазовых баллистических устано-

вок и численное моделирование с использованием трехмерного конечно-разностного метода. При проведении экспериментальных работ было испытано несколько вариантов защитных экранов, предназначенных для защиты от воздействия высокоскоростных метеорно-техногенных частиц топливного бака космического корабля, в том числе экран с двойной сеткой и эквивалентный по массе щит Уиппла. Особенности метательного процесса и общие теоретико-экспериментальные результаты проделанной работы изложены в статье [5].

Конструкция экрана с двойной сеткой и его внешний вид изображены на рис. 2, 3. В качестве внешнего экрана была выбрана тканая сетка из нержавеющей стали с параметрами $a = 0.5$ мм и $d = 0.3$ мм (где a и d – просвет ячейки и диаметр проволоки), второй бампер представлял собой такую же сетку с параметрами $a = 0.3$ мм и $d = 0.2$ мм. В качестве аналога топливного бака КА использовался лист из сплава АМгб толщиной 2 мм. Расстояние между внешним и вторым бампером составляло 15 мм, между вторым бампером и фрагментом бака – 35 мм.

Рис. 2. Схема двойного сеточного экрана, применявшегося в экспериментах

Рис. 3. Лицевая сторона сборки «сетки – элемент бака»

Испытания на стойкость данной экранной конструкции к высокоскоростному воздействию твердых частиц проводились с помощью метательных установок – пороховой пушки калибром 8 мм и легкогазовой пушки МПХ 23/8 калибра 8 мм. Результаты испытаний показали значительное увеличение работоспособности сеточного экрана по сравнению с обычным экраном аналогичной поверхностной плотности. На рис. 4 показаны экспериментальные точки для данного сеточного экрана и эквивалентного щита Уиппла (толщина бампера из АМг6 1.0 мм), полученные в ходе испытаний, и баллистические предельные зависимости для эквивалентного щита Уиппла, а также для щита Уиппла с большей (1.5 мм) толщиной бампера.

Рис. 4. Экспериментальные точки экрана и кривые БПЗ для экрана с двойной сеткой [4] и эквивалентного ему щита Уиппла

Основная часть экспериментов проводилась с использованием дюралюминиевых шариков в качестве ударника. Однако в нескольких опытах ($d > 0.4$ мм на рис. 4) использовались и другие материалы в качестве ударника – поддон из поликарбоната с железным шариком или с железной шайбой (или без них). Для данных экспериментов нанесенный на графике диаметр ударника пересчитан по его массе в эквивалент дюралюминиевого шарика.

Для данной конструкции двойного сеточного экрана суммарная поверхностная плотность двух сеток составляет 2.51 кг/м^2 , что соответствует пластине из АМг6 толщиной 0.95 мм. Теоретические баллистические предельные зависимости для двойного сеточного экрана и щита Уиппла с бампером из АМг6 толщиной 1 мм (при толщине алюминиевой задней стенки 2 мм), использовавшихся в экспериментах, приведены на рис. 5.

В целом, по результатам экспериментов [4] можно отметить, что экран с двойной сеткой, как и в серии экспериментов [1], показал существенно большую эффективность по сравнению с эквивалентной (по массе) защитой Уиппла, о чем непосредственно свидетельствовали, в частности, эксперименты при скорости ударника 2.9 км/с.

Рис. 5. Баллистическая предельная зависимость для экрана с двойным сеточным бампером (НИИ ПММ ТГУ) и эквивалентного щита Уиппла

ЛИТЕРАТУРА

1. Christiansen E.L., Kerr J.H. Mesh double-bumper shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection // Int. J. Impact Engineering. 1993. V. 14. P. 169–180.
2. Christiansen E.L., Kerr J.H. Ballistic limit equations for spacecraft shielding // Int. J. Impact Engineering. 2001. V. 26. P. 93–104.
3. Герасимов А.В., Паиков С.В., Христенко Ю.Ф. Защита космических аппаратов от техногенных и естественных осколков. Эксперимент и численное моделирование // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 4(16). С. 70–78.
4. Герасимов А.В., Христенко Ю.Ф. и др. Отчет об опытно-конструкторской работе «Численное исследование защитных свойств сеточных конструкций защитных экранов и рациональное проектирование их весовых характеристик». Отчет по договору 05/10 от 01.04.2010. Томск, 2010. 106 с.
5. Герасимов А.В., Паиков С.В., Христенко Ю.Ф. Теоретико-экспериментальное исследование ударного взаимодействия осколков с различными видами защиты космических аппаратов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Механика деформируемого твердого тела. 2011. № 4 (4). С. 1433–1435.

Статья поступила 23.06.2015 г.

Dobritsa B.T., Dobritsa D.B. SERVICEABILITY OF MESH DOUBLE-BUMPER SHIELDS UNDER THE ACTION OF HIGH-VELOCITY PARTICLES

DOI 10.17223/19988621/36/8

Results of experimental and theoretical research of hypervelocity impact protection performance of the mesh double-bumper shields are considered. The experimental works with use of powder and light-gas guns were carried out for testing several options of the shields intended for hypervelocity impact protection of a fuel tank of the spacecraft from meteoroids and orbital debris particles. Ballistic limit equations for the mesh shields that showed greater performance in comparison with the mass equivalent Whipple shield are considered.

Keywords: spacecraft, meteoroids and orbital debris, light-gas gun, Whipple shield, mesh shield, ballistic limit equation, hypervelocity impact.

Dobritsa Boris Timofeevich (Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow, Russian Federation)

E-mail: fs11@bmstu.ru

Dobritsa Dmitry Borisovich (FSUI named after S.A.Lavochkin, Khimky, Russian Federation)

E-mail: dobrica@laspace.ru

REFERENCES

1. Christiansen E.L., Kerr J.H. Mesh double-bumper shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection. *Int. J. Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 169–180.
2. Christiansen E.L., Kerr J.H. Ballistic limit equations for spacecraft shielding. *Int. J. Impact Engineering*, 2001, vol. 26, pp. 93–104.
3. Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. Zashchita kosmicheskikh apparatov ot tekhnogennykh i estestvennykh oskolkov. Eksperiment i chislennoe modelirovanie. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2011, no.4(16). pp.70–78. (in Russian)
4. Gerasimov A.V., Khristenko Yu.F. i dr. *Otchet ob opytно-konstruktorskoy rabote «Chislennoe issledovanie zashchitnykh svoystv setochnykh konstruksiy zashchitnykh ekranov i ratsional'noe proektirovanie ikh vesovykh kharakteristik»*. Otchet po dogovoru 05/10 ot 01.04.2010. Tomsk, 2010. 106 p. (in Russian)
5. Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. Teoretiko-eksperimental'noe issledovanie udarnogo vzaimodeystviya oskolkov s razlichnymi vidami zashchity kosmicheskikh apparatov. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela*, 2011, no. 4 (4), pp. 1433–1435. (in Russian)