Наука и Образование МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сетевое научное издание ISSN 1994-0408 Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 06. С. 123–142.

DOI: 10.7463/0615.0778339

Представлена в редакцию: 20.05.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 629.7

Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора

Зеленцов В. В.^{1,*}

zelentsov33@gmail.com

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Количество космического мусора (особенно мелкого не наблюдаемого) непрерывно растет, а, следовательно, растет и вероятность встречи космического аппарата с частицами мелкого КМ. В данной работе приведены материалы, используемые при конструировании защитных экранов, и описано их поведение при соударении с высокоскоростной частицей. Рассмотрены конструктивные схемы защитных экранов, предназначенных для защиты космического аппарата от воздействия КМ. На основании анализа рассмотренных материалов и конструкций предлагается вариант конструктивного исполнения защи тного экрана

Ключевые слова: космический мусор, защитный экран, сотопанели, пенопанели, бронеткань, Кевлар, сэн-двич-панели, углепластик, сетка, композиционные материалы

Введение

В околоземном космическом пространстве (ОКП) находится большое количество техногенного космического мусора (КМ) различного размера (от десятков метров до нескольких микрон). КМ состоит из космических аппаратов (КА), отработавших свой срок, последних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков, операционного мусора, а также огромного количества мелких фрагментов, образовавшихся в результате взрыва или разрушения при соударении аппаратов. Весь КМ делится на две группы: наблюдаемый, размером более 100 мм, и не наблюдаемый менее 100 мм - мелкий космический мусор (МКМ).

Уязвимость КА в потоке КМ может быть определена как комбинация вероятностей отказов его различных систем вследствие ударов фрагментов КМ, с учетом важности (критичности) каждой компоненты и их дублирования (избыточности). Количество ударов и их характеристики — это лишь исходная информация для определения ожидаемых последствий и влияния их на выполнение КА своей целевой функции. Возможны следующие виды последствий ударов:

• выход из строя основных систем (приводящие к отказу всего КА);

- повреждения после ударов высокоскоростных фрагментов КМ, воздействия импульсных нагрузок от удара или влияние плазмы, приводящие к отказам или поврежденных элементов КА, не влияющих на работоспособность КА;
- изменение работы поврежденного элемента во времени;
- поверхностная деградация от ударов.

Оценка уязвимости КА считается основанием для определения степени и вида защиты КА. В настоящее время применяются три вида защиты — пассивная, активная и операционная (стандарт IADC). Пассивная защита — это не что иное, как бронирование КА или элементов его конструкции. Активная защита — предполагает использование средств наблюдения для обеспечения заблаговременного предупреждения о грозящем столкновении и последующее применение мер защиты критических систем КА или совершение маневра уклонения от возможного столкновения. Вокруг МКС существует «защитный периметр» в форме параллелепипеда размером в четыре километра в высоту (по 2 километра вверх и вниз от станции), и 25 километров в длину и ширину. Если один из фрагментов наблюдаемого КМ может попасть в этот периметр то, USSTRATCOM уведомляет об этом NASA. В связи с тем, что маневрирование МКС осуществляется с помощью российского сегмента, информация передается в ЦУП. Сигнал об опасности подается в ЦУП за 28,5 часа до возможного момента встречи, временной интервал объясняется тем, что. . между Хьюстоном и ЦУП-ом существует значительная разница во времени, плюс резерв времени на составление циклограммы работы [1,2]. Операционная защита предусматривает изменение конструкции КА с допущением возможности умеренной деградации КА или изменения его функций с целью снижения общего риска для миссии. Задача конструктора КА — найти компромисс между стоимостью реализации каждого метода и эффективностью защиты. В настоящее время проблема защиты КА от воздействия частиц МКМ может быть решена только за счет применения защитных экранов.

1. Вероятность встречи космического аппарата с частицей мелкого космического мусора

Вероятность встречи КА с частицами МКМ зависит от размера КА и плотности распределения частиц МКМ. На рис.1 показано распределение КМ по высотам орбит, для трех размеров: крупный наблюдаемый КМ — более 10 см; среднеразмерный КМ — от 1 см до 10 см; мелкий КМ — менее 1 см [3].

Вероятность встречи КА с частицей МКМ носит случайный характер и может быть определена с использованием закона Пуассона,

$$P_1 = e^{-N_1}$$

где N₁ – число встреч с частицами МКМ, за время существования КА

Величина N1 в первом приближении может быть определена из выражения

 $N_1 = V\rho$,

где *V* - объем КА, *р* – пространственная плотность частиц. Пространственная плотность частиц может быть определена из ГОСТ Р 25645.167-2005.



Рис.1. Распределения пространственной плотности КМ различных размеров по высотам

Вероятность не пробоя оболочки КА частицей МКМ, тоже носит случайных характер и определяется также из закона Пуассона

$$P_2 = e^{-N_2}$$

где N₂ – число встреч с частицами МКМ, не приводящих к повреждению КА за время его существования.

Тогда вероятность не повреждению КА частицей МКМ равна

$$P = e^{-(N_1 + N_2)}.$$

Для МКС предусмотрены два интервала вероятностей встречи с крупным фрагментом КМ, определяющие выполнение маневра. Если вероятность встречи равна 1/10000...1/1000000, то станция осуществляет маневр уклонения, если это не скажется на выполнении текущей программы (прием транспортного корабля и др.). При вероятности от1 до 1/10000 выполнение маневра уклонения обязательно [2].

2. Поведение материалов при встрече с фрагментами космического мусора

Для изготовления защитных экранов могут быть использованы различные конструкционные материалы, как однородные, так и композиционные. Конструкция экрана может быть однослойной и многослойной. В работах [4,5] рассмотрено поведение различных материалов при соударении с фрагментами МКМ. Листовой металл. Как правило, используются алюминиевые сплавы. При ударе частицы КМ о преграду генерируются высокие давления и температуры, при которых могут расплавиться или даже испариться материал преграды (в точке контакта) и частицы, что приведет к образованию кратера или отверстия в месте контакта, объем которого значительно больше, чем объем частицы. Если размер частицы на 10...15% больше толщины стенки, то при скорости соударения более 7 км / с возможен пробой тонкой стенки и образование трещин в округ кратера. Частица при ударе фрагментирует и эти фрагменты, проникая во внутренний объем КА могут нанести серьезные повреждения оборудованию и коммуникациям. Хрупкие материалы (ФЭП, стекло, керамика и др.) При ударе частицы о преграду (иллюминаторы, солнечные батареи, керамические хрупкую плитки теплозащиты и др.) также образуется кратер или отверстие, размер которых значительно больше, чем в случае пластичного материала. Это происходит в результате низкой прочности на разрыв этих материалов. Армированные пластмассы Если преграда, выполненная из пластмассы, армированной волокном подвергается воздействию частицы МКМ, то также образуются кратеры или отверстия.. В отличие от металлической преграды, форма кратера или отверстия более нерегулярно из-за распада волокон и матричного материала. Поскольку материал преграды, как правило, многослойный то происходит расслаивание слоев, в результате этого зона повреждения имеет значительные размеры. Металлическая пена [5]. Установлено, что наряду с теплоизоляционными и звукопоглощающими свойствами пеноалюминий показывает при деформации сильно нелинейное поведение, характерное для пористых структур. Это свойство может быть использовано для восприятия удара. Электрическая и термическая проводимости пеноалюминия значительно меньше, чем у сплошного металла, а прочностные характеристики лежат в области свойств обычных металлических материалов. Как и металлические обладают вспененные пластмассы. пены отличными энергоабсорбирующими свойствами, но на более высоком уровне прочности. Материал хорошо обрабатывается пилением, сверлением, фрезерованием, обточкой. В качестве способов соединения могут быть использованы склеивание, пайка или специальная сварка. Металлическая сетка. Как показал эксперимент [6], частица, проходя через сетку, частично разрушается, теряя при этом скорость, мелкие фрагменты, образовавшиеся в результате разрушения частицы, образуют облако. Частицы, составляющие облако обладают меньшей энергией и их воздействие на преграду распределено по большой поверхности, что значительно снижает эффект их воздействия на преграду. Тканые материалы [7]. Текстильные материалы Кевлар, Армос, Терлон и др. применяются для

изготовления текстильной брони. Для получения защитных тканых материалов используют параармидные или полиэтиленовые волокна. Полученные на их основе материалы обладают высокими механическими характеристиками: плотность – 0,97...1,7 г/см³, модуль упругости – 80...330 ГПа, предел прочности – 1,5...6 ГПа, удлинение при разрыве – 1,5...6% и прочность на сжатие – 1,4...2,6 ГПа. *Трехслойные панели* Трехслойные панели состоят из двух листов, как правило, алюминиевого сплава толщиной 0,5...1,2 мм, между которыми размещаются соты из алюминиевой фольги, соединенные с помощью клея. Трехслойные материалы широко применяются в конструкциях КА.

3. Конструкция защитных экранов

Мелкий КМ, находящийся в ОКП можно подразделить на различные фракции по размеру и происхождению [8]. В таблице 1, приведена классификация космического мусора по размеру, в соответствии с моделью MASTER 2009 (2001)/.

Наименование	Происхождение	Диапазон размеров частиц
D		
Выведение на орбиту	Последние ступени ракет носителей,	
и технологические	разгонные блоки, отбрасываемые элементы	0,5 мм 4 мм
операции на орбите	конструкций, при раскрытии солнечных	(Уэстфорд Иглы) и
(раскрытие антенн,	батарей и антенн, иглы Уэстфорда,	10 см 10 м
солнечных батарей и	запущенные США в начале шестидесятых	
др.)	годов и, др.	
Фрагменты	Фрагменты, образовавшиеся в результате	0,1 мм 10 м
	взрывов и столкновений	
Капли жидкости	Капли жидкостей, вы текающие из	2 мм 4 см
	поврежденных емкостей и радиаторов	
Частицы шлака	Крупные частицы, выделяющиеся во время	
	окончания работы двига те лей твердого	0,1 мм 3 см
	топли ва	
Частицы пыли	Мелкие частицы, выделяющиеся во время	
	работы твердотопливных ракетных двигателей	1 мкм 80 мкм
Чешуйки краски	Образуются в результате деградации	2 мкм 0,2 мм
	поверхности КА	
Экстракция	Выбросы материала, образующиеся в	
	результате у даров микрометеоритов и частиц	1 мкм 5 мм
	космического мусора о корпус КА	

Таблица 1	Классификация	КМ по его	размеру	космического	мусора
			F F J		J

Отработка конструкции защитных экранов в условиях космического полета не возможна, ввиду большой стоимости запуска, поэтому разработка защитных экранов ведется на основе лабораторных экспериментов и математического моделирования. Результаты, полученные при экспериментах на отдельных образцах, устанавливаемых на КА, не позволяют оценить достоинства и недостатки защитных экранов. Ниже рассмотрены различные варианты, предлагаемых конструктивных решений защитных экранов. Эффективность защиты КА от воздействия частиц МКМ зависит: от расположения экрана относительно защищаемой конструкции, от толщины экрана, материала из которого изготовлен экран и от угла падения частицы. В работе [9] проведены результаты моделирования взаимодействия частицы с различными экранами. На рис 2 показана схема моделирования, исследовалось влияние материала и толщины экрана, расстояния между экраном и защищаемой конструкцией и угла встречи частиц с экраном на защитные качества экрана.



Рис. 2 Схема эксперимента а) прямой экран, б) наклонный экран; 1 – частица; 2 – защитный экран; 3 – конструкция (A1), толщина 3 мм, D1,D2 – датчики регистрации параметров нагружения. Форма частицы сфера диаметром 3,6 и 5 мм, скорость соударения 6 км/с и 10 км/с

В результате моделирования были получены следующие результаты. В таблице 2 приведено влияние материала экрана на условия пробития частицей МКМ. Приняты следующие обозначения: P1 — максимальное давление в датчике D1; P2 — максимальное давление в датчике D2; P1(AI) —максимальное давление в датчике N° 1 при использовании экрана из Al толщиной 3,7 мм и величине h = 37 мм.

Результаты расчетов свидетельствуют о большей эффективности экранов из легких материалов. Полученные результаты горят о том, что материалы из группы органо и углепластиков целесообразно использовать для создания экранной защиты КА и ОС

Материал экрана	Al	Fe	W	Органопластик
P1/p2(Al)	1	2,56	4,22	0,72
P2/p1	0,44	0,17	0,11	0,46

Таблица 2 Влияние материала экрана на эффективность защиты

В таблице 3 показано влияние толщины экрана δ на пробитие, при условиях эксперимента, приведенных выше. Характерно, что уменьшение толщины экрана в 2 раза приводит к увеличению нагрузки на защищаемую конструкцию в 3 раза, а установка экрана толщиной 6 мм способствует снижению нагрузок всего на 5–7%. Снижение

толщины экрана способствует уменьшению расходимости запреградного потока и меньшей делокализации энергии ударяющей частицы. Из расчетов следует, что толщина экрана должна быть не менее характерного размера частицы из того же материала.

б мм	1,85	3,7	6
P1/p2(Al)	3,11	1	0,93
P2/p1	0,07	0,44	0,48

Таблица 3 Влияние толщины стенки экрана на эффективность защиты

В таблице 4 показано влияние расстояния между экраном и защищаемой конструкцией. Увеличение зазора в 6 раз приводит к снижению пикового давления на защищаемую конструкцию в 30 раз. Поверхность, защищаемой конструкции нагружается более равномерно, что следует из сопоставления нагрузок, возникающих в 1 ом и 2 ом датчиках. Таким образом, величина зазора между экраном и защищаемой конструкцией должна быть не менее 15–20 характерных размеров ударяющей частицы.

Таблица 4 Влияние зазора между экраном и стенкой на эффективность защиты

һ мм	10	20	40	60
P1/p2(Al)	4,8	1,6	0,61	0,18
P2/p1	0,034	0,21	0,73	0,91

В таблице 5 приведено влияние угла встречи с экраном. При использовании наклонных экранов нагрузки на стенку могут существенно возрасти, за счет более интенсивного откола от задней поверхности экрана.

Таблица 5 Влияние угла падения частицы на эффективность защиты

Толщина наклонного экрана, мм	1,85	3,7
Максимальное давление в датчиках 1 (2)	84 (40)	77 (50)

.Экраны могут быть однослойные и многослойные.

Однослойные экраны

Однослойный экран представляет собой металлический лист, который не способен защитить основную конструкцию КА при соударении с частицей МКМ размером более толщины материала экрана [10], при этом в случае не пробоя на противоположной стороне происходит откол материала стенки экрана. Эти осколки обладают достаточно большой скоростью и способны нанести серьезные повреждения несущим конструкциям и механизмам КА. Для предотвращения разлета осколков на обратную повер хность экрана наклеивается слой ткани (кевлар) или пенопласта. На рис. 3 приведен вариант экрана для защиты топливных баков, разработанный на основе экспериментальных исследований [11]. В качестве частиц МКМ использовались алюминиевые шарики диаметром 1,5... 2,5 мм при скоростях соударения 2,03... 3,95 км/с. Стенка экрана имеет толщину 1,7 мм, толщина стенки бака – 1,9 мм, расстояние между ними – 38 мм.



Рис. З Вариант экрана для защиты топливных баков: 1 – стенка бака; 2 – ЭВТИ; 3 – стенка экрана

Экран, выполненный из трехслойной панели также можно считать однослойным. На рис 4 приведена конструктивная схема трехслойной панели (А) и форма деформации сот, после удара (Б). Если при ударе частицы МКМ происходит пробой переднего листа, то происходит деформация (выпучивание и) стенок сот. В случае пробития заднего листа происходит разрушение панели (отрыв сот и т.п.). При попадании частицы на ребро сот происходит интенсивное разрушение сотовой конструкции [12].



Рис. 4 Экран из трехслойной панели: а) - конструктивная схема панели; б) – разрушенная панель (диаметр частицы 1,75 мм, скорость 7,2 км/с, угол падения 45⁰); 1 – ЭВТИ; 2 – передняя стенка; 3 – соты; 4 – задняя стенка

Однослойные экраны, не смотря на их простоту и низкую стоимость, не нашли широкого применения в качестве защитных экранов КА. Применяются многослойные экраны способные выдержать соударение с крупными частицами.

Многослойные экраны

Двух слойный экран. Эффективность защитного тонкостенного экрана может быть значительно улучшена за счет использования, двух тонкостенных экранов, разнесенных

на некоторое расстояние. На рис 5 приведена конструктивная схема двухслойного экрана, состоящего из двух металлических листов. Если частица пробивает первый тонкий экран, высокие давление и тепло, возникающие при соударении, приводят к фрагментации, плавлению или даже испарению частицы. В результате образуется облако космического мусора, состоящее из мелких фрагментов разрушившейся частицы и отколовшихся от стенки осколков. Частицы, составляющие облако распределяются по большой площади поверхности второго экрана, а, следовательно, обладают меньшей пробивной энергией. Частицы облака либо не способны пробить вторую стенку экрана, либо в случае пробоя еще больше фрагментизируются и теряют скорость. Защитные свойства подобных экранов крайне низкие, он способен защитить корпус КА при встрече с частицей небольшой массы и малой скорости соударения.



Рис.5 Дву хслойный металлический экран: 1 – передняя металлическая стенка экрана; 2 - задняя металлическая стенка экрана; 3 – стенка корпуса КА

Пятислойная панель. На рис. 6, приведена конструктивная схема экрана состоящего из трех металлических листов разделенных слоями сот. Конструкция более эффективна, чем трехслойная панель, но имеет аналогичные недостатки и не защищает от частиц МКМ средней величины (4...6 мм).



Рис. 6 Пятислойная панель: 1 – ЭВТИ; 2 – передний лист; 3 - соты; 4 – средний лист; 5 – соты; 6 – задняя стенка

Наиболее эффективным средством защиты от частиц КМ различных размеров могут служить защитные экраны, выполненные в виде сэндвич панелей – панелей, состоящих из слоев различных материалов.

В работе [12] проведено сравнение двух видов экранов, состоящих, из двух рядов сетки, алюминиевых листов и заполнителей. Заполнитель одного экрана сотопанели, другого пенопанели. На рис. 7 приведены конструктивные схемы экранов.

Экран из сотопанелей способен защитить КА при встрече с крупной частицей. На первой и второй сетках происходит дробление частицы на более мелкие фрагменты, которые обладают меньшей массой и энергией, по сравнению с исходной частицей, что значительно снижает пробивную мощность частицы. Но панель такой конструкции обладает значительной массой. Для установки экранов требуются дополнительные конструкции, которые имеют массы и объемы.

Экран из пенопанелей работает аналогично экрану из сотопанелей, но обладает более высоким энергопоглащением, а, следовательно, и более эффективно защищает КА. На рис. 8 приведены результаты испытаний экранов, состоящих из сотопанелей и пенопанелей.



Рис. 7 Конструктивная схема экранов: а) сэндвич - панели с двумя экранами из сотопанелей и сетки: 1,2 – сетка из толстой проволоки; 3,5,6,8 – алюминиевые стенки (толщиной 1,5...3 мм); 4,7 – соты алюминиевые; 9 несущая конструкция КА; б) сэндвич - панели с двумя экранами из пены и сетки 1,2 – сетка из толстой проволоки; 3,5 – алюминиевые стенки (толщиной 1,5...3 мм); 6 – заполнитель из алюминиевой пены; 7 несущая конструкция КА



Рис.8 Сравнение повреждений экранов выполненных из пены (левый) и сотопанелей (правый), верхний ряд передняя панель, второй ряд наполнитель, третий ряд внутренняя панель. Параметры частицы: алюминиевая сфера диаметром 3,6 мм; скорость соударения 6,5 км/с.[12]

Как видно из рис. 8, при пробое сетки и первой стенки происходит интенсивное разрушение сот, а затем пробитие задней стенки, в случае заполнителя из пены повреждение заполнителя незначительно, при этом задняя стенка не пробита и даже не имеет вмятины. В таблицах 6,7 приведены характеристики материалов из которых выполнены экраны сравниваемые экраны.

N⁰	Тип слоя	Материал	Толщина,	Поверхностная
слоя			ММ	плотность г/см ²
1	1-ая сетка	30х30 SS304 сетка (0 = 0,016 ")	0,457	0,20
2	2-ая сетка	30х30 SS304 сетка (0 = 0,016 ")	0,457	0,20
3	Внешний лист	A16061-T6	0,4064	
4	Сотовый заполнитель	1.8-5052002	12,7	0,37
5	Задний лист	A16061-T6	0,4064	
6	Передний лист	A16061-T6	0,4064	
7	Сотовый заполнитель	1.8-5052002	12,7	0,37
8	Задний лист	A16061-T6	0,4064	
9	Конструкция КА	Al2024-T3	1,016	0,43

Таблица. 6 Характеристики экрана из сотопанелей

.Nº	Тип слоя	Материал	Толщина,	Поверхностная
слоя			ММ	плотность г/см ²
1	1-ая сетка	30х30 SS304 сетка (0 = 0,016 ")	0,457	0,20
2	2-ая сетка	30х30 SS304 сетка (0 = 0,016 ")	0,457	0,20
3	Внешний лист	A16061-T6	0,4064	
4	Заполнитель из пены	10 PPI A 16101-T6 foam	12,7	0,56
5	Задний лист	A16061-T6	0,4064	
6	Панель из пены	10 PPI A 16101-T6 foam	12,7	0,29
7	Конструкция КА	A12024-T3	1,016	0,43

Таблица. 7 Характеристики экрана из пенопанелей

Как видно из таблиц плотность поверхностная плотность экранов одинакова 0,43 г/см², но как показал эксперимент, экран с использованием пены в качестве заполнителя более предпочтителен, чем экран с заполнителями из сотопанелей.

Более перспективными представляются защитные экраны, выполненные с использованием алюминиевой пены и промежуточной металлической стенки. На рис.9 представлена конструктивная схема защитной панели с использованием двух пеноэкранов и металлического экрана между пенопанелями.



Рис.9 Конструктивная схема экрана с панелями из алюминиевой пены: 1 – первый экран; 2 – металлическая стенка; 3 – второй экран из пены; 4 – конструкция КА

Работа экрана из пены аналогична работе экрана из двух сотопанелей. Поскольку, пена обладает высоким энергопоглощением, то необходимости в дроблении частицы нет. В случае пробоя первого пеноэкрана частица, потерявшая большую часть своей энергии, встречает металлический экран, который задерживает ее. В случае пробоя стенки раздробленная частица и осколки стенки задерживаются вторым пеноэкраном.

Для защиты европейского модуля МКС «Колумбус», переходных отсеков между BODE 2 и BODE3 и транспортного корабля ATV применяются защитные панели с использованием ткани Кевлар [13,14,15]. Материал, из которого изготовлены панели, позволяет придавать экрану любую форму, что упрощает крепление защиты на КА. На рис. 10 приведена конструктивная схема сэндвич панели с использованием ткани Кевлар.



Рис.10 Конструктивная схема защитного щита «Коламбоса»: 1 – алюминиевый лист толщиной – 2,5 мм; 2 – наполнитель — Кевлар+Nextel+эпоксидная смола; 3 – теплоизоляция, приклеенная к стенке; 4 – задняя стенка толщиной 4,5 мм

В таблице 7 приведены характеристики щита модуля «Коламбос».

Слой	Материал	Поверхностная
		плотность, г/см ²
Внешний слой	А16061-Т6 2,5 мм	0,7
Наполнитель	Nextel 312 AF-62 4 слоя	0,4
	Kevlar 129 Стиль 812 18 слоев	0,9
	Эпоксидный клей 914	
Теплоизоляция	MLI	0,2
Задняя стенка	А12219-Т851, 4,8 мм	1,3
Общая толщина 22 мм		3,5
Несущая стенка	А12219-Т851, 2,8 мм	7,4
	Kevlar+Эпоксидный клей	3,8
Общая толщина щита 79 мм		14,7

Таблица 7. Характеристики материала слоев защитного экрана модуля МКС «Коламбос»

Поведение композитной сэндвич панели под воздействием частицы МКМ в значительной степени зависит от химического состава материала, размера жил, и его кондиционирование (однонаправленный планировка вверх, ткани). Распределение различных компонентов структуры также важно. Возможны три вида повреждения: пробой, образование облака осколков и загрязнение.

Возможны два вида композитных сэндвич панелей [13], состоящих из комбинации сотовых панелей, ткани Кевлар и панелей из углеродного волокна. На рис. 11, приведены схемы сэндвич панелей с использованием композитных материалов.



Рис.11 Сравнение различных конструкций защитных экранов

Композитная сэндвич панель защитного экрана состоит из двух слоев композиционного материала с заполнителем между ними он, устанавливается на некотором расстоянии от защищаемой конструкции. Экран изготавливается при помощи намотки из углеродного волокна HMA 2236 (с Ероп 9405 смолы и отвердителя Ероп 9470 ("волокна G50")). Структура может также сочетаться с экранирующими слоями препрегов ткани Кевлар (120 стиля переплетения, Кевлар 49 препрегов и смолы Fiberite 934) пропитанные клеем Scotweld. Применение углеродных волокон повышает прочностные характеристики экрана. Применяемая панель изготавливается из углеродных (намотка 45[°]), толщина 0,2 мм) и армидный (намотка 45⁰, толщина 0,2 мм) волокон соответственно с закладными восьмиугольными элементами (118048 элементов). Панель испытывалась на ударные нагрузки ударником с высокой скоростью, при заданных скоростях имело место пробитие панели, но скорость частицы после пробития была близка к нулю.

По результатам анализа, рассмотренных вариантов конструкции защитных экранов предлагается следующая конструкция экрана.



Рис. Предлагаемый вариант конструкции экрана

Экран состоит из: 1 – сетка (диаметр проволоки 1,4...2,0 мм), предназначенная для дробления крупных частиц (менее 100 мм); 2 – слой ткани Кевлар задерживающей мелкие фрагменты, образующиеся при разрушении частицы; 3 – слой из углеродного материала, задерживающий крупные фрагменты; 4 – наполнитель из пеноалюминия, выполняющий основную защитную функцию; 5 – слой ткани Кевлар, задерживающий проникшие осколки ; 6 – страхующая панель из пеноалюминия; 7 – защищаемая конструкция.

Приближенные параметры экрана и его составляющих, приведены в таблице 8

Материал	Марка материала	Толщина,	Поверхностная
		ММ	плотность, кг/м ²
Сетка	313-1,4-20Х13 ГОСТ 3306-88	1,4	4,5
Бронеткань	Армос, артикул 5363/11-91	2,5	0,214
Углепласти к	КМУ-9, КМУ- 9т		0,15
Пеноалюминий		12	0,3
Бронеткань	Армос, артикул 5363/11-91	2,5	0,214
Пеноалюминий		12	0,3
Общая ха	арактеристика экрана	3540	5,678

Таблица 8 Примерные характеристики экрана и его составляющих

Ведутся работы по разработке материалов, позволяющих значительно снизить массу защитных экранов, используя физико-химические свойства материалов.

В работе [16] приводится информация о работах по разработке материала способного затягивать любые небольшие повреждения, возникающие при столкновении с частицами МКМ. Однако, как отмечает профессор Фельдштейн В.А., подобная защита не в состоянии, при отсутствии защитных экранов, обеспечить защиту КА. В перспективе, применение этих материалов позволит сократить массу защитных экранов на 3%.

В институте Физической химии и электрохимии имени А.Н.Фрумкина Российской академии наук предложена оригинальная концепция защиты КА от воздействия высокоскоростных частиц, позволяющая значительно снизить массу защитных экранов [17]. Снижение массы защитного экрана достигается за счет использования изолированных активных элементов, закрепленных на тканевой основе. При внедрении частицы МКМ (метеорида) происходит химическое превращение активных элементов экрана, приводящее к большому выходу газофазных продуктов и и повышению давления на стенки образующегося кратера, что приводит к улучшению фрагментации и увеличению поперечного импульса фрагментов разрушения. Перспективными активными материалами являются композиционные материалы с фторопластовой матрицей и металлическим наполнителем. Экспериментальные данные позволяют оценивать снижение массы защитных экранов КА примерно на 30...40%.

Выводы

В результате анализа рассмотренных конструктивных схем различных защитных экранов можно сделать следующие выводы.

- Для изготовления защитных экранов КА, защищающих от воздействия высокоскоростных частиц наиболее эффективны экраны их легких материалов (органо и углепластиков), а толщина экрана должна быть больше чем размер частицы. Экран устанавливается на расстоянии не менее, 20...30 размеров частицы от защищаемой конструкции.
- 2) Однослойный экран не способен защитить конструкцию от частицы, летящей со скоростью более 6...7 км/с.
- 3) Для защиты от высокоскоростных частиц (скорости соударения более 7 км/с), размером более 5 мм необходимо применять многослойные экраны из сэндвич панелей. Для изготовления панелей необходимо применять материалы, обладающие высокой. энергопоглащающей способностью (металлическая мена).
- 4) В случае пробития экрана, для защиты от облака, состоящего из фрагментов разрушившейся частицы и осколков разрушенного экрана необходимо устанавливать второй более легкий экран, обеспечивающий защиту.

Список литературы

- 1. Возможности и средства оценки повреждений космических аппаратов. 2012 // Необычный: Необычный портал о необычных вещах. Режим доступа: http://unnatural.ru/damages-assessment (дата обращения 01.04.2015).
- 2. Как NASA управляет МКС для избежания столкновений с космическим мусором. 2013 // GT: сайт. Режим доступа: <u>http://geektimes.ru/post/188286/</u> (дата обращения 05.04.2015).
- 3. Распределение космического мусора. Часть І // Необычный: Необычный портал о необычных вещах. Режим доступа: <u>http://unnatural.ru/debris-distribution</u> (дата обращения 13.03.2015).
- 4. Anghileri M., Castelletti L.-M.L., Invernizzi F., Mascheroni M., Pigoli F. Development of Orbital Debris Impact Protection Panels // 5th European LS-DYNA Users Conference. Methods and Techniques. 2005. Available at: <u>http://www.dynalook.com/european-conf-2005</u>, accessed 01.05.2015.
- 5. Возможности применения пеноалюминия // ЭКАТ: сайт компании. Режим доступа: <u>http://ekokataliz.ru/penomaterialyi/baza-znaniy/penometallyi/vozmozhnosti-primeneniya-penoalyuminiya/</u> (дата обращения 02.03.2015).
- 6. Пашков С. Моделирование пробития сеточных преград высокоскоростными частицами. 2011. Режим доступа: <u>http://ps300.narod.ru/fr3d/fobos.htm</u> (дата обращения 02.03.2015).
- 7. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 191 с.
- Gade A., Miller A. ESABASE2 / Debris Release 6.0. Technical Description. PC Version of DEBRIS Impact Analysis Tool. Gerhard Drolshagen, GmbH, 2013. 131 p.

- 9. Агеев А.И., Ахметханов Р.С., Гаденин М.М. и др. Гл. 9. Объекты ракетнокосмического комплекса // Высокотехнологичный комплекс и безопасность России. Проблемы обеспечения безопасности оборонно-промышленного комплекса России. Т. 11. Разд. П. М.: Институт экономических стратегий, 2005. С. 59-130.
- 10. Зеленцов В.В. Проблемы мелкого космического мусора // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 4. С. 89-104. DOI: <u>10.7463/0415.0764904</u>
- Герасимов А.В., Пашков 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.
- Ryan S., Christiansen E.L. NASA/TM-2009-000000. Honeycomb vs. Foam: Evaluating a Potential Upgrade to ISS Module Shielding for Micrometeoroids and Orbital Debris. NASA, 2009.
- 13. Destefanis R., Amerio E., Briccarello M., Belluco M., Faraud M., Tracino E., Lobascio C. Space environment characterisation of Kevlar®: good for bullets, debris and radiation too // Universal Journal of Aeronautical & Aerospace Sciences. 2014. Vol. 2. P. 80-113.
- 14. Destefank D., Lambert M., Schäfer F., Drolshagen G., Francesconi D. Debris shielding development for the ATV integrated cargo carrier // Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris (18-20 April 2005, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany). Europeans Space Agency, 2005. P. 453-458. Режим доступа: http://adsabs.harvard.edu/full/2005ESASP.587..453D (дата обращения 10.03.2015).
- Putrar R., Schäfer F., Rombery O., Lambert M. Vulerability of shielded pipes and heat pipes to hypervelocity impacts // Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris (18-20 April 2005, Darmstadt, Germany). Europeans Space Agency, 2005. P. 459-464. Available at: http://adsabs.harvard.edu/full/2005ESASP.587..459P , accessed 10.03.2015.
- 16. Российские учёные придумали самозалечивающееся покрытие для космических кораблей. 2009 // Федеральное космическое агентство (Роскосмос): сайт. Режим доступа: <u>http://www.federalspace.ru/6061/</u> (дата обращения 03.06.2015).
- 17. Малкин А.И., Занозин В.М., Топоров Ю.П., Кононенко М.М., Шумихин Т.А. Разработка новой концепции защиты космических аппаратов от метеороидов и космического мусора на основе использования активных композиционных материалов: отчет о НИР / Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина. М., 2007.

Science & Education of the Bauman MSTU

Electronic journal ISSN 1994-0408 Science and Education of the Bauman MSTU, 2015, no. 06, pp. 123–142.

DOI: 10.7463/0615.0778339

Received:

20.05.2015

© Bauman Moscow State Technical Unversity

Protecting Spacecraft Fragments from Exposure to Small Debris

V.V. Zelentsov^{1,*}

^{*}zelentsov33@gmail.com

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: debris, shield, honeycomb, foam, ballistic fabric, Kevlar, sandwich panels, carbon fiber, mesh, composite materials

Since the launch of the first artificial Earth satellite a large amount of space debris has been accumulated in near-earth space. This debris comprises the exhausted spacecrafts, final stages of rocket-carriers and boosters, technological space junk, consisting of the structure elements, which are separated when deploying the solar arrays, antennas etc., as well as when undocking a booster and a spacecraft. All the debris is divided into observable one of over 100 mm in size and unobservable debris. In case of possible collision with the observed debris an avoidance manoeuvre is provided. The situation with unobservable debris is worse, its dimensions ranging from 100 mm to several microns. This debris is formed as a result of explosions of dead space objects and at collisions of destroyed spacecraft fragments against each other. This debris moves along arbitrary trajectories at different speeds.

At collision of a spacecraft with fragments of small-size space debris, various consequences are possible: the device can immediately fail, suffer damages, which will have effect later and damages, which break no bones to the aircraft. Anyway, the spacecraft collision with small-size debris particles is undesirable. The protective shields are used to protect the aircraft from damage. Development of shield construction is complicated because the high cost of launch makes it impossible to conduct field tests of shields in space. All the work is carried out in the laboratory, with particles having co-impact speeds up to 10 km/s (possible speeds are up to 20 km/s) and spherically shaped particles of 0.8 ... 3 mm in diameter.

Various materials are used to manufacture shields. These are aluminum sheet, sandwich panels, metal mesh, metal foam, and woven materials (ballistic fabric). The paper considers single-layer (from sheet metal sandwich materials) and multilayer shield designs. As experimental studies show, a single-layer shield protects colliding at speeds less than 4 ... 5 km/s, at higher speeds particles breaks through them. As a result, a cloud is formed. It consists of fragments, destroying particle, and debris split-off from the obstacle. For reliable protection the sandwich panels are used. Shield design comprises two panels: the first panel being multi-layer and the second one being single-layer. The task of the first panel is to provide the maximum fragmented particle and reduce its speed. The second panel protects the structure from the cloud fragments resulting from breakdown of the first panel. The European module "Columbus" that is part of the ISS and

transport vehicle ATV have the protective shield of the similar construction. The shield consists of "aluminum sheet with 2 mm thickness; filler - Kevlar + Nextel + epoxy resin, thermal insulation; the second panel comprises aluminum sheet of 3 mm thickness.

Modeling and experiments show high efficiency of steel mesh as a protective shield. Spacecraft design consists, mainly, of aluminum alloys therefore space debris is from the same material. At collision with steel mesh a particle is decelerated and destroyed. Therefore, time-Rushan ability of the particle significantly decreases. The second layer, opposing to the impact of high-speed particles, is foam metal (foam-Lumina). It is successfully used in the automotive engineering. Ballistic fabric (such as Kevlar) is capable to protect from the effect of the fragmentation cloud.

References

- 1. Vozmozhnosti i sredstva otsenki povrezhdenii kosmicheskikh apparatov [Opportunities and means to assess spacecraft damage]. 2012. Neobychnyi: website. Available at: http://unnatural.ru/damages-assessment, accessed 01.04.2015. (in Russian).
- Kak NASA upravlyaet MKS dlya izbezhaniya stolknovenii s kosmicheskim musorom [How NASA controls ISS to avoid collisions with space debris]. 2013. GT: website. Available at: <u>http://geektimes.ru/post/188286/</u>, accessed 05.04.2015. (in Russian).
- 3. Raspredelenie kosmicheskogo musora. Chast' 1 [Distribution of space debris. Pt. 1]. Neobychnyi: website. Available at: <u>http://unnatural.ru/debris-distribution</u>, accessed 13.03.2015. (in Russian).
- Anghileri M., Castelletti L.-M.L., Invernizzi F., Mascheroni M., Pigoli F. Development of Orbital Debris Impact Protection Panels. 5th European LS-DYNA Users Conference. Methods and Techniques. 2005. Available at: <u>http://www.dynalook.com/european-conf-2005</u>, accessed 01.05.2015.
- 5. Vozmozhnosti primeneniya penoalyuminiya [Possibilities of application of aluminum foam]. ECAT: company website. Available at: <u>http://ekokataliz.ru/penomaterialyi/baza-znaniy/penometallyi/vozmozhnosti-primeneniya-penoalyuminiya/</u>, accessed 02.03.2015. (in Russian).
- 6. Pashkov S. *Modelirovanie probitiya setochnykh pregrad vysokoskorostnymi chastitsami* [Simulation of breaking of grid barriers with high-speed particles]. 2011. Available at: <u>http://ps300.narod.ru/fr3d/fobos.htm</u>, accessed 02.03.2015. (in Russian).
- 7. Kobylkin I.F., Selivanov V.V. *Materialy i struktury legkoi bronezashchity* [Materials and Structures of light armor protection]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 191 p. (in Russian).
- 8. Gade A., Miller A. *ESABASE2 / Debris Release 6.0. Technical Description. PC Version of DEBRIS Impact Analysis Tool.* Gerhard Drolshagen, GmbH, 2013. 131 p.
- 9. Ageev A.I., Akhmetkhanov R.S., Gadenin M.M., et al. Gl. 9. Ob"ekty raketnokosmicheskogo kompleksa [Ch. 9. Objects of rocket-space complex]. In book: Vysokotekhnologichnyi kompleks i bezopasnost' Rossii. Problemy obespecheniya bezopasnosti oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii. T. 11. Razd. 2 [High-tech complex and security of Russia. The security concerns of the military-industrial complex of Rus-

sia. Vol. 11. Sec. 2]. Moscow, Institute for Economic Strategies Publ., 2005, pp. 59-130. (in Russian).

- 10. Zelentsov V.V. Problems of Small Debris. Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU, 2015, no. 4, pp. 89-104. DOI: 10.7463/0415.0764904 (in Russian).
- 11. Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. Space vehicle protection from mancaused and natural debris: experiment and numerical simulation. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika = Tomsk State University. Journal* of Mathematics and Mechanics, 2011, no. 4 (16), pp. 70-78. (in Russian).
- 12. Ryan S., Christiansen E.L. NASA/TM-2009-000000. Honeycomb vs. Foam: Evaluating a Potential Upgrade to ISS Module Shielding for Micrometeoroids and Orbital Debris. NASA, 2009.
- Destefanis R., Amerio E., Briccarello M., Belluco M., Faraud M., Tracino E., Lobascio C. Space environment characterisation of Kevlar®: good for bullets, debris and radiation too. Universal Journal of Aeronautical & Aerospace Sciences, 2014, vol. 2, pp. 80-113.
- 14. Destefank D., Lambert M., Schäfer F., Drolshagen G., Francesconi D. Debris shielding development for the ATV integrated cargo carrier. *Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris*, 18-20 April 2005, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany. Europeans Space Agency, 2005, pp. 453-458. Available at: http://adsabs.harvard.edu/full/2005ESASP.587..453D, accessed 10.03.2015. (in Russian).
- Putrar R., Schäfer F., Rombery O., Lambert M. Vulerability of shielded pipes and heat pipes to hypervelocity impacts. *Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris*, 18-20 April 2005, Darmstadt, Germany. Europeans Space Agency, 2005, pp. 459-464. Available at: <u>http://adsabs.harvard.edu/full/2005ESASP.587..459P</u>, accessed 10.03.2015.

http://www.federalspace.ru/6061/ , accessed 03.06.2015. (in Russian).

17. Malkin A.I., Zanozin V.M., Toporov Yu.P., Kononenko M.M., Shumikhin T.A. Razrabotka novoi kontseptsii zashchity kosmicheskikh apparatov ot meteoroidov i kosmicheskogo musora na osnove ispol'zovaniya aktivnykh kompozitsionnykh materialov: otchet o NIR [Development of new concept of protection of spacecraft from meteoroids and debris through the use of active composite materials: report on scientific research works]. Moscow, Russian academy of sciences A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistr, 2007. (In Russian, unpublished).