

УДК 629.7

## ЗАЩИТА РОССИЙСКИХ МОДУЛЕЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ОТ ТЕХНОГЕННЫХ ЧАСТИЦ

© 2012 О.В. Волков<sup>1</sup>, А.В. Горбенко<sup>1</sup>, И.В. Шевченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва, г. Королев

<sup>2</sup> МАТИ – Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского, г. Москва

Поступила в редакцию 16.03.2012

В настоящей работе представлена концепция защиты Российских модулей Международной космической станции от метеороидных и техногенных частиц. Представлена методика оптимизации экранной защиты на стадии проектной проработки. С ее использованием проведена разработка дополнительных противоосколочных панелей для гермокорпуса служебного модуля.

Ключевые слова: *техногенные частицы, вероятность, пробой, гермооболочка, баллистическая предельная зависимость, дополнительная противоосколочная панель*

С разработкой международной космической станции (МКС) развитие пилотируемых орбитальных станций вступило в новый этап, который характеризуется значительным увеличением времени эксплуатации до 30 лет, жизненного объема до 1000 м<sup>3</sup>, численности экипажа до 6 человек. Поэтому вопросы безопасности, связанные с взаимодействием с окружающей средой, приобретают всё большее значение. В первую очередь это относится к опасности разгерметизации станции в результате столкновения с частицами как естественного (метеороиды), так и искусственного (техногенные частицы) происхождения, причем столкновение с техногенными частицами в настоящее время представляет основную опасность. Риск разгерметизации в результате столкновения с метеороидными и техногенными (м/т) частицами прямо пропорционален предполагаемому времени эксплуатации и площади уязвимой поверхности станции. Для МКС произведение этих факторов увеличивается по сравнению с ОС «Мир», по крайней мере, на порядок величины. Поэтому при заданном приемлемом риске разгерметизации защита МКС должна быть спроектирована таким образом, чтобы выдерживать удары частиц большего размера, чем могла выдерживать ОС «Мир». Кроме того, техногенная среда имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при разработке экранной защиты.

Оценки показывают, что с учётом технических и финансовых ограничений экранная защита не в состоянии обеспечить снижение риска пробова гермообъёма всей станции до приемлемо

малого уровня. Разгерметизация в результате пробова является нештатной ситуацией, требующей разработки мероприятий по уменьшению влияния её последствий на безопасность экипажа и выживаемость станции. Таким образом, при разработке средств защиты МКС от м/т частиц решаются две задачи:

- разработка экранной защиты с учётом особенностей техногенной среды;
- определение последствий пробова герметичных модулей станции на её выживаемость и разработка мероприятий по снижению риска катастрофических последствий пробова.

В настоящей работе представлена концепция защиты РС МКС от метеороидных и техногенных частиц с учётом её соответствия концепции защиты американского сегмента в рамках взаимосогласованных требований по степени допустимого риска пробова отдельных модулей. Проектным параметром, определяющим степень защищённости модулей МКС от ударов м/т частиц, является вероятность непробоя (ВНП) гермооболочек модулей и гермооболочек непустых топливных баков. Вероятность  $N$  пробоев за время эксплуатации  $T$  определяется распределением Пуассона:

$$P(N) = \frac{\bar{N}^N}{N!} e^{-\bar{N}} \quad (1)$$

где  $\bar{N}$  – усреднённое ожидаемое число пробоев (параметр распределения) за время  $T$ . Из (1) имеем:

$$ВНП = P(0) = e^{-\bar{N}} \quad (2)$$

$$\bar{N} = n(d) \cdot S_{эфф} \cdot T \quad (3)$$

где:  $n(d)$  – плотность кумулятивного потока м/т частиц [част./м<sup>2</sup>/год];  $T$  – время эксплуатации [год];  $S_{эфф}$  – эффективная уязвимая поверхность гермооболочки [м<sup>2</sup>].

Волков Олег Валерьевич, заместитель директора программы. E-mail: oleg.volkov@sfoc.ru

Горбенко Андрей Владимирович, ведущий инженер-математик. E-mail: Gorbenko\_AV@bk.ru

Шевченко Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой. E-mail: mmm@mati.ru

В общем случае величины  $n(d)$  и  $S_{эфф}$  для элементов поверхности гермооболочки сложным образом зависят от ориентации этого элемента относительно вектора орбитальной скорости космического аппарата (КА), скорости соударения и стойкости конструкции к высокоскоростному удару. При фиксированной ориентации КА относительно вектора орбитальной скорости величина  $\bar{N}$  может быть представлена в виде суммы вкладов отдельных элементов поверхности гермооболочки:

$$\bar{N} = \sum_i \bar{N}_i \quad (4)$$

Расчёт величин  $\bar{N}_i$  представляет собой сложную математическую задачу, решаемую на ЭВМ с помощью специальной программы, например программы «БАМПЕР», разработанной в НАСА. В программе в качестве исходных данных используются модели микрометеороидной и техногенной среды, а также трёхмерные конечно-элементные геометрические модели КА, представленные в формате I-DEAS Universal и созданные в пакете I-DEAS Master Series. Характеристики стойкости экранной конструкции к высокоскоростному пробоем вводятся в программу в виде баллистических предельных зависимостей (БПЗ), описываемых расчётными подпрограммами. БПЗ определяет зависимость минимального размера сферического алюминиевого ударника, вызывающего пробой гермооболочки, от скорости и угла соударения. БПЗ определяются на основе расчётных и экспериментальных данных. Сертификации БПЗ выполняется по определенной процедуре путём проведения испытаний образцов экранной защиты модулей на пробой на высокоскоростных ударных стендах.

На стадии проектной проработки методика оптимизации экранной защиты включает следующие этапы работ:

1) исходя из заданной величины вероятности непробоя  $P(0)$  из формулы (2) определяется среднее количество ударов м/т частиц  $\bar{N}$ , сопровождаемых пробоем;

2) используя модели м/т частиц ( $n(d)$ ) и исходя из оценки  $S_{эфф}$ , по формуле (3) определяется минимальный размер частиц  $d_0$ , удар которых экранная защита модуля должна выдержать;

3) исходя из толщины гермооболочки и конструкции внешних элементов корпуса выбираются параметры типовой экранной защиты (толщины и количество экранов, расстояние между ними), обеспечивающей стойкость к ударам частиц с размером менее  $d_0$ ;

4) гермооболочка разбивается на зоны, отличающиеся толщиной гермооболочки, возможностью установки экранов, ориентацией относительно вектора орбитальной скорости (для профилирования защиты в зависимости от степени опасности по направлениям полёта м/т частиц), и создаётся компьютерная трёхмерная конечно-элементная модель модуля (геометрический

файл в текстовом формате) для дальнейших расчётов ВНП;

5) на основе анализа результатов расчётов определяется относительный вклад отдельных зон в общую вероятность пробоя с целью модификации параметров экранов в отдельных зонах. Этот процесс имеет итерационный характер с целью снижения риска пробоя до требуемого уровня.

Значения ВНП отдельных модулей МКС устанавливаются, исходя из принципа равного удельного риска пробоя для всех модулей МКС, в качестве которого принимается средняя вероятность пробоя единицы поверхности гермооболочки МКС. Удельный риск пробоя установлен на уровне  $10^5 \text{ м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ . Таким образом, требуемое минимальное значение ВНП модуля прямо пропорционально эффективной площади поверхности его гермооболочки. ВНП модулей МКС рассчитывается с использованием моделей метеороидной и техногенной среды. Требуемые значения ВНП модулей РС МКС приведены в таблице 1.

С использованием методики оптимизации экранной защиты для служебного модуля (СМ) проведена разработка дополнительных противосколочных панелей (ДПП) для наиболее критичной зоны гермокорпуса СМ – цилиндрической части рабочего отсека малого диаметра, не закрытой радиатором. Выполнены расчёты вероятности непробоя (ВНП) гермооболочки СМ с установленными ДПП с целью верификации требования к ВНП СМ.

**Таблица 1.** Требуемые значения ВНП модулей РС МКС

Элемент	Требования по ВНП	Продолжительность, лет	Дата запуска
ФГБ	0,979	15	ноябрь 1998 г.
Служебный модуль (после запуска)	0,94	3,7	ноябрь 1999 г.
Служебный модуль (после установки ДПП)	0,95	15	1999 г.
МЛМ	0,979	15	2012 г.
ШК МЛМ	0,998	15	2012 г.
Стыковочный отсек 1	0,996	2	март 2000 г.
МИМ 1	0,994	15	2010 г.
МИМ 2	0,995	15	2009 г.
"Прогресс М", "Прогресс М1"	0,85	15	1999г.
"Прогресс М", "Прогресс М1" (после усиления защиты)	0,95 (ПС)	15	2012 г.
"Союз ТМА"	0,8	15	1999 г.
"Союз ТМА" (после усиления защиты)	0,93 (ПС)	15	2012 г.

Требования по ВНП для СМ были определены для двух этапов эксплуатации:

- на первом этапе продолжительностью 3,7 лет ВНП СМ соответствует фактическому значению для существующей конструкции экранной защиты и составляет 0,94;

- на втором этапе продолжительностью 11,3 года ВНП соответствует усиленному варианту экранной защиты и должна составлять 0,95 в течение 15 лет (модель техногенной среды образца 1991 г.).

С целью повышения ВНП СМ до требуемого значения 0,95 были разработаны ДПП для установки на цилиндрической части рабочего отсека малого диаметра, не закрытой радиатором. Конструкция ДПП на РО малого диаметра была заимствована с ДПП, установленных на конусной части между рабочими отсеками большого и малого диаметра (рис. 1).

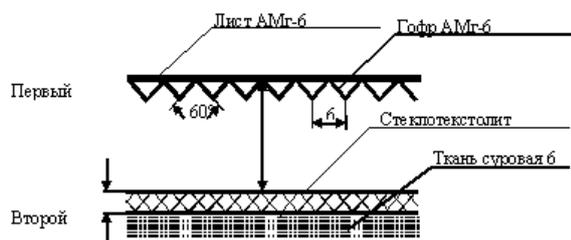


Рис. 1. Конструкция ДПП

При расчетах ВНП зон РО малого диаметра, защищённых ДПП, были использованы БПЗ, полученные при испытаниях образцов ДПП на высокоскоростной пробой, установленных на конусной части СМ. Основанием для этого является тот факт, что толщина образцов гермооболочки в испытаниях составляла 1,86 мм, что достаточно близко как к толщине гермооболочки в конусной части (2 мм АМгб) и в цилиндрической части РО малого диаметра (1,6 мм АМгб). Результаты расчётов ВНП СМ за 15 лет после уста-

новки 5-ти ДПП на РО малого диаметра в 2012 г. представлены в таблице 2. В расчётах учитывалось затенение СМ радиаторами и солнечными панелями, а также вертикально ориентированными солнечными панелями СМ. Расчёты проводились для двух вариантов экранной защиты: без ДПП на РО малого диаметра и с установленными ДПП на РО.

Таблица 2. Результаты расчетов ВНП СМ

Модель	ВНП РО без ДПП	ВНП РО без ДПП	Относительное снижение риска, %
ORDEM 1991	0,929	0,933	5,8
ORDEM 2000	0,953	0,961	17,4
Метеороиды	0,9866	0,9878	9,0
ORDEM 1991+ метеороиды	0,9170	0,922	6,3
ORDEM 2000+ метеороиды	0,94	0,949	17,2

Результаты расчётов ВНП служебного модуля показали следующее. При установке пяти панелей ДПП на рабочем отсеке малого диаметра относительное снижение риска пробоя гермооболочки СМ за 15 лет составит 6,3% при использовании в расчётах ВНП модели техногенной среды 1991 г. и 17,2% при использовании модели 2000 г. ВНП СМ за 15 лет, рассчитанное начиная с 2012 г. после установки пяти ДПП на РО малого диаметра, повышается от 0,917 до 0,922 по модели 1991 г. и от 0,94 до 0,949 по модели 2000 г. Таким образом, ВНП=0,949, рассчитанное по модели 2000 г., с учётом погрешностей, практически удовлетворяет требуемому значению (0,95).

## PROTECTION OF RUSSIAN MODULES AT THE INTERNATIONAL SPACE STATION AGAINST TECHNOGENIC PARTICLES

© 2012 O.V. Volkov<sup>1</sup>, A.V. Gorbenko<sup>1</sup>, I.V. Shevchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Rocket and Space Corporation “Energia” named after S.P. Korolyov, Korolyov-city

<sup>2</sup> MATI – Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovskiy, Moscow

In this paper the concept of protection the Russian modules at the International space station from meteor-like and technogenic particles is presented. The method of optimization the screen protection at a stage of design study is presented. With its use development of additional antifragmental panels for office module pressure-tight housing is carried out.

Key words: *technogenic particles, probability, breakdown, pressure-tight housing, ballistic limiting dependence, additional antifragmental panel*

Oleg Volkov, Deputy Director of the Program. E-mail: oleg.volkov@sfoc.ru

Andret Gorbenko, Leading Engineer Mathematician. E-mail:

Gorbenko\_AV@bk.ru

Igor Shevchenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department. E-mail: mmm@mati.ru