

Учёт герметизации при расчёте надёжности функциональных узлов космических аппаратов

Карчевский Д.О., Полесский С.Н.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

dokarchevskiy_1@edu.hse.ru, spolessky@hse.ru

Аннотация. Для наиболее эффективной работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры необходима её герметизация. Герметизация обеспечивается с помощью прокладок, которые имеют надёжность, а вследствие и интенсивность отказов. Интенсивность отказов прокладки зависит от множества различных факторов, подсчёт которых необходим для вычисления одной. Однако, этот подсчёт не является тривиальной задачей, для этого нужно использовать как можно более современные источники информации.

Ключевые слова: надёжность, радиоэлектронная аппаратура.

Данное научное исследование (№ проекта 14-05-0038) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2014/2015 гг. Надёжностью функциональных узлов космических аппаратов (ФУ КА) является одним из ключевых свойств и означает сохранение во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции ФУ КА в заданных режимах и условиях применения, хранения и транспортирования. ФУ КА согласно модели эксплуатации по [ГОСТ РВ 20.39.304-98] относится к космической аппаратуре, который делится на четыре группы исполнения:

- 5.1 – условия, пригодные для человека, например, это относится к оборудованию, расположенному на МКС, коэффициент эксплуатации аппаратуры в этих условиях равен 1.
- 5.2 – условия, при которых аппаратура находится в герметичной полости, заполненной газом, коэффициент эксплуатации аналогичен предыдущему – 1.
- 5.3 – условия, в которых отсутствует полная герметизация, что может привести к некорректной работе оборудования. Коэффициент эксплуатации увеличивается в четыре раза по сравнению с вышеприведёнными.
- 5.4 – условия отсутствия защиты от попадания космического мусора на оборудование.

Согласно [Справочник «Надёжность ЭРИ»] коэффициент эксплуатации может колебаться от одного до тридцати двух.

От этого коэффициента зависит надёжность каждой детали, а значит и надёжность всего ФУ КА в целом.

Согласно модели эксплуатации групп аппаратуры 5.1 и 5.2 от 5.3 и 5.4 отличаются уровнем давления, что сказывается на показателях надежности. Поэтому многие разработчики дорогостоящей аппаратуры подверженные влиянию давления, проводят ее герметизацию, что в свою очередь традиционно не учитывается при расчетах надежности [Жаднов и др., 2003]. А модель расчета вероятности безотказной работы за время эксплуатации можно определить по модели:

$$P_{\text{ФУ КА}}(t) = P_{\text{ЭЧ}}(t) * P_{\text{МЧ}}(t), \quad (1)$$

где: $P_{\text{ФУ КА}}(t)$ – вероятность безотказной работы за время t ; $P_{\text{ЭЧ}}(t)$ – вероятность безотказной работы электронной части аппаратуры; $P_{\text{МЧ}}(t)$ – вероятность безотказной работы механической части аппаратуры.

Вероятность безотказной работы устройства, как видно из формулы (1), напрямую зависит от вероятностей безотказной работы электронной и механической частей ФУ КА, которые можно вычислить, зная значения интенсивностей отказов в режиме эксплуатации [Жаднов и др., 2003]:

$$P_{\text{МЧ}} = e^{-\lambda_{\text{МЧ}} * t}, \quad (2)$$

где: $\lambda_{\text{МЧ}}$ – интенсивность отказов механической части аппаратуры.

$$P_{\text{ЭЧ}} = e^{-\lambda_{\text{ЭЧ}} * t}, \quad (3)$$

где: $\lambda_{\text{ЭЧ}}$ – интенсивность отказов электрической части аппаратуры.

Если преобразовать модель (1) и выразить их через интенсивности отказов по моделям (2) и (3), то можно определить интенсивность отказов ФУ КА как:

$$\lambda_{\text{ФУ КА}} = \lambda_{\text{ЭЧ}} + \lambda_{\text{МЧ}}.$$

$\lambda_{\text{МЧ}}$ определяет свойства герметизации в основном она определяется интенсивностью отказов прокладки [NSWC, 2011].

Главной причиной отказа прокладки – является утечка. Целостность прокладки зависит от совместимости газа и уплотняющих компонентов, условий среды уплотнения и применяемой нагрузки во время использования. Ниже в таблице 1 перечислены типовые механизмы отказов и причины, приводящие к утечке [Карчевский, 2014].

Для расчёта $\lambda_{\text{МЧ}}$ необходимо адаптировать модель из справочника [NSWC-11], которая представлена ниже:

$$\lambda_{\text{МЧ}} = \lambda_{\text{Г}}, \quad (5)$$

где: $\lambda_{\text{Г}}$ – интенсивность отказа прокладки.

Согласно этому справочнику $\lambda_{\text{Г}}$ зависит от базовой интенсивности отказов прибора и различных поправочных коэффициентов, связанных с деградационными факторами [Маркин и др., 2010]:

$$\lambda_{\text{Г}} = \lambda_{\text{Г.Б}} * \prod_{i=1}^n C_i, \quad (6)$$

где: $\lambda_{\text{Г.Б}}$ – базовый коэффициент отказа прокладки; C_i – поправочные коэффициенты, зависящие от условий эксплуатации, а именно:

$C_{\text{Д}}$ – коэффициент, зависящий от давления газа;

$C_{\text{У}}$ – коэффициент, зависящий от допустимой утечки;

C_p – коэффициент, зависящий от габаритных размеров прокладки;
 $C_{ТВ}$ – коэффициент, зависящий от твёрдости прокладки и допустимого нажима на неё.

C_T – коэффициент, зависящий от гладкости поверхности;

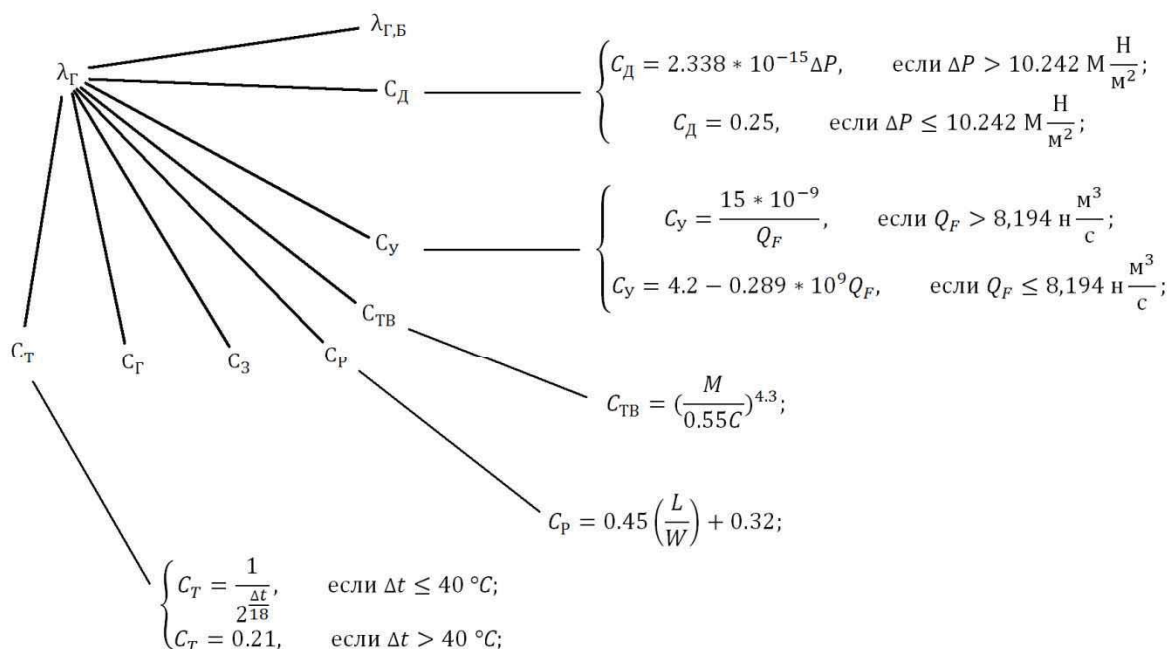
C_T – коэффициент, зависящий от температуры;

$C_з$ – коэффициент, зависящий от загрязняющих веществ.

Таблица 1. Типовые отказы и их причины для статических прокладок

№	Типовые отказы	Причина отказа
1	Износ	загрязнение
		неровность
		вибрация
		плохое качество поверхности
2	Деформация, повреждение прокладки	экстремальная температура
		неровность
		эксцентricность детали
		перегрузка, выдавливание
		недокрутка или перетягивание болта
3	Повреждение поверхности, хрупкость прокладки	недостаток смазки
		загрязнение
		ухудшение качества газа
		ухудшение температурных условий
		периоды простоя детали
		воздействие атмосферы, окисление
4	Скольжение	чрезмерная температура
		скачки уровня давления жидкости
		ухудшение качества материала
		температурное расширение, скачки температуры
5	Деформация при сжатии	чрезмерное сжатие прокладки
		неполная вулканизация
		высокая температура
6	Повреждения установки	недостаточный размер желоба
		острые края поверхностей соседних частей
		плохая защита запчастей
7	Взрыв газа	создание высокого давления

Теперь мы можем построить структурную модель λ_T (см. рисунок 1).



ΔP – давление газа; $Q_{Ф}$ – допустимая утечка; L – длина прокладки; W – минимальная ширина прокладки; M – твёрдость прокладки; C – допустимый нажим на прокладку; t – температура

Рис. 1. Дерево модели интенсивности отказов прокладки

Коэффициент $C_{У}$ зависит от допустимой утечки газа согласно приведённой структурной схеме.

На рисунке 2 показан график зависимости величины коэффициента утечки от размера допустимой утечки, из которого можно вычислить прямую зависимость $\lambda_{Г}$ от $Q_{Ф}$. Для этого, значения всех остальных поправочных коэффициентов были взяты равными единице (см. рис. 3).

Также была построен график зависимости интенсивности отказов прокладки от давления газа (см. рис. 4), которые показывает, что при увеличении давления газа значение интенсивности отказов растёт.

Как видно из исследования математической модели (см. рис. 1), на интенсивность отказов прокладки (а именно свойства герметизации), а как следствие и на интенсивность отказов ФУ КА влияет множество факторов и учет которых при проведении расчета показатели надежности необходим, особенно для аппаратуры чувствительной к изменению давления.

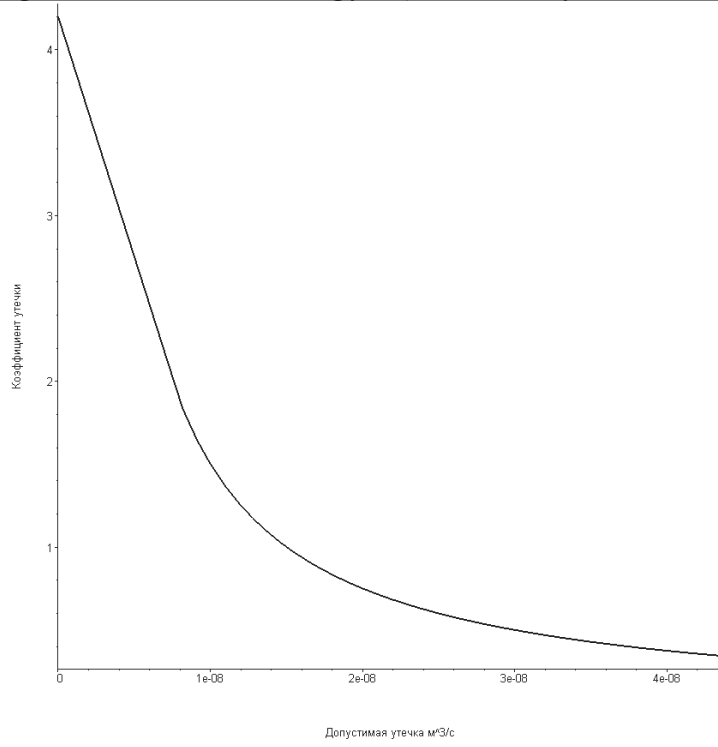


Рис. 2. График зависимости C_Q от Q_F

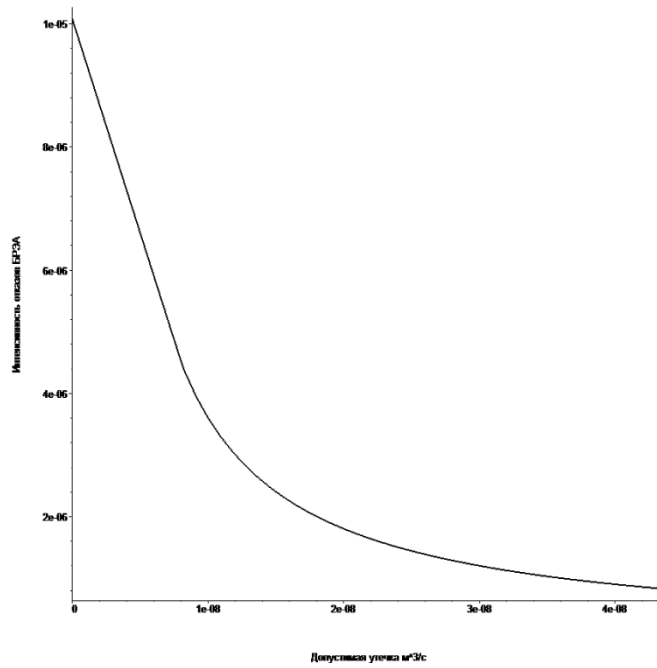


Рис. 3. График зависимости λ_G от Q_F

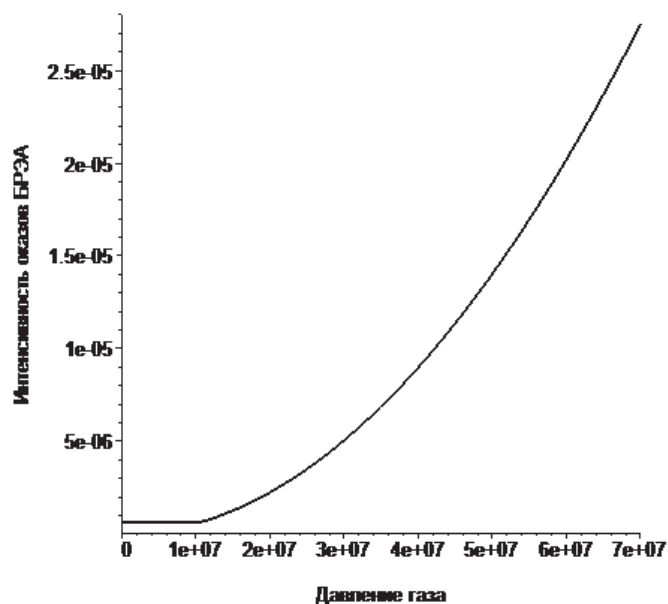


Рис. 4. График зависимости λ_G от P_5

Список литературы

[ГОСТ РВ 20.39.304-98] ГОСТ РВ 20.39.304-98. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам.

[NSWC, 2011] NSWC-2011/LE10. Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment.

[Карчевский Д.О. 2014] Карчевский, Д.О. Типовые отказы статических заглушек при жестких условиях эксплуатации. / Д.О. Карчевский. // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ. Материалы конференции. - М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2014. - с. 174.

[Маркин и др., 2010] Маркин, А.В. Методы оценки надёжности элементов механики и электромеханики электронных средств на ранних этапах проектирования. / А.В. Маркин, С.Н. Полесский, В.В. Жаднов. // Надёжность. - 2010. - № 2. - с. 63-70.

[Жаднов и др., 2003] Жаднов, В.В. Автоматизация проектных исследований надёжности радиоэлектронной аппаратуры: научное издание. / В.В. Жаднов, Ю.Н. Кофанов, Н.В. Малютин, Е.П. Власов, И.В. Жаднов, С.П. Замараев, А.С. Измайлов, К.В. Марченков, С.Н. Полесский, С.А. Працикин, В.В. Сотников. - М.: Радио и связь, 2003. - 156 с.

[Справочник «Надёжность ЭРИ»] Справочник «Надёжность ЭРИ» - М.: МО РФ, 2006.