

КВАЛИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО КРИТЕРИЮ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ

А.П. Тютнев, И.В. Кочетов, В.Т. Семенов
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

И.П. Безродных
(ИКИ РАН)

Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с проведением расчётно-конструкторских работ, направленных на решение проблемы квалификации электротехнических материалов, проводов и кабелей для применения на внешней поверхности космических аппаратов. Проведён сравнительный анализ потоков частиц радиационных поясов Земли и солнечных космических лучей на геостационарной орбите и солнечно-синхронных орбитах.

Ключевые слова: радиационная стойкость, глубинный ход дозы, критерии работоспособности материалов, разрешение на применение, доза за сферическим экраном на разных орбитах.

Введение

Одним из факторов, ограничивающих применение электротехнических материалов, проводов и кабелей (в дальнейшем материалы и кабели) на борту космического аппарата (КА), является их радиационная стойкость, поскольку они оказываются под воздействием космических ионизирующих излучений в течение всего срока активного существования (САС) КА. Особенно актуальна проблема радиационной стойкости материалов и кабелей, предназначенных для использования на его внешней поверхности. Обычно большая часть поверхности КА закрыта матами экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), которые дополнительно выполняют и роль защиты от космических ионизирующих излучений с низкой проникающей способностью. Но в ряде случаев эта защита отсутствует, и тогда материалы и кабели оказываются в непосредственном контакте с космической средой (высокий вакуум, термоциклирование, ультрафиолетовая радиация Солнца и, конечно, весь спектр энергий заряженных частиц космического пространства).

На этапе эскизного проектирования разработчикам космической техники необходимо знать, обладают ли предполагаемые для использования в КА материалы и кабели радиационной стойкостью, соответствующей требованиям к эксплуатации КА на заданной орбите в течение всего САС. Требования по радиационной стойкости задаются на основе усреднённых спектров и плотностей потока электронов и протонов на орбите КА.

Основная трудность с квалификацией материалов и кабелей, предназначенных для использования на внешней поверхности КА, связана с тем фактом, что плотность потока заряженных частиц

космической плазмы достаточно сильно снижается с ростом их энергии. Это обстоятельство в свою очередь приводит к ярко выраженному ходу поглощённой дозы по глубине материала или кабеля. В случае, если поглощённая доза в приповерхностном слое окажется заведомо выше радиационной стойкости материала согласно существующим справочным данным, возникает серьёзная проблема с его квалификацией для рассматриваемого КА.

Общие положения

Нас в первую очередь будут интересовать орбита геостационарных спутников (ГС) и солнечно-синхронные орбиты (ССО) КА, разработанные и разрабатываемые ВНИИЭМ. Это геостационарная орбита, на которой эксплуатировался КА «Электро», и ССО КА «Зонд», КА «Ионосфера» и серия КА «Метеор» с высотами около 652 и 832 км. Основным интересом представляет анализ возможности применения полимерных материалов, а также проводов и кабелей и их использования при конструировании КА, поскольку именно эти материалы, обладающие низкой и средней радиационной стойкостью, доставляют наибольшие проблемы разработчикам космической техники.

Как известно, существующие справочные данные по радиационной стойкости материалов и кабелей [1 – 3] получены при их облучении гамма-квантами или быстрыми электронами в нормальных условиях на образцах, в которых поглощённая доза однородна по объёму и используется в качестве показателя радиационной стойкости. В случае электроизоляционных материалов в качестве критериальных параметров выбираются механическая прочность (предел прочности и отно-

сительное удлинение при разрыве) или пробивное напряжение на постоянном токе при снижении хотя бы одного из них на 50% по сравнению с исходным значением. Для проводов, кабелей и резиновых изделий в качестве показателя радиационной стойкости используется доза, при которой ещё сохраняется их работоспособность после проведения всего цикла климатических и механических испытаний по техническим условиям. Полученный показатель радиационной стойкости для этих изделий обычно заметно ниже, чем для использованных электроизоляционных материалов. Так, разработчики кабелей с изоляцией из фторопласта Ф-4 рекомендуют увеличить их радиационную стойкость (0,1 Мрад) до 1 Мрад, если кабель эксплуатируется не на воздухе, а в вакууме или инертной среде в условиях фиксированного монтажа.

Основной исходной информацией для расчёта доз в материалах и кабелях являются дифференциальные (по энергии) потоки заряженных частиц (электронов и протонов) на орбите КА за весь САС. По ним методом Монте-Карло рассчитываются дозы в кремнии в центре шара за сферическими экранами различной толщины из Al. Эти данные позволяют учесть защитный эффект от всего КА, элементов конструкции изделия и даже поверхностных слоёв рабочей изоляции. Чтобы использовать табличные данные по ослаблению дозы от потоков электронов и протонов, необходимо привести реальную поверхностную плотность элементов конструкции по стандартной схеме (см. с. 5, 6) к эквивалентной массовой плотности Al (в г/см²). Кроме того, приходится считаться с тем обстоятельством, что эквивалентная доза в полимерах может оказаться до 30% выше найденного для Si значения [4].

На практике известны две основные геометрии применения электроизоляционных материалов на поверхности КА. Во-первых, это плоская геометрия, применимая при рассмотрении слоёв эмалей, лаков, грунтов и полимерных плёнок, а также слоистых пластиков, прессматериалов, фольгированных диэлектриков, волокнистых материалов, клеев, резиновых уплотнителей и композиционных материалов, включая маты ЭВТИ. Во-вторых, это изделия с аксиальной геометрией, такие как провода, коаксиальные кабели, трубки, крепёжные нити и резиновые шланги. В ряде случаев этот второй тип геометрии может быть сведён к плоскому случаю.

Радиационная обстановка на орбите. Радиационные условия в околоземном космическом пространстве определяются в основном потоками

частиц естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), частицами солнечных космических лучей (СКЛ) и частицами галактических космических лучей (ГКЛ) [5 – 7]. Для изучаемой проблемы важны только потоки электронов и протонов ЕРПЗ и потоки протонов СКЛ, поскольку нас интересует поглощённая доза (ионизационный эффект), а не доза смещения (важная в полупроводниках и неорганических диэлектриках), и тем более не потоки тяжёлых ядер ГКЛ и СКЛ, ответственных за единичные сбои и отказы бортовой электронной аппаратуры КА, поглощённая доза от которых пренебрежимо мала. Потоками протонов и электронов ГКЛ и потоками электронов СКЛ можно пренебречь, поскольку их интенсивность в области энергий менее 100 МэВ на несколько порядков меньше, чем потоки протонов СКЛ и потоки протонов и электронов ЕРПЗ.

На рис. 1 и 2 приведены интегральные энергетические спектры протонов ЕРПЗ, протонов СКЛ и электронов ЕРПЗ в период максимума солнечной активности (СА) для трёх орбит, наиболее типичных для КА, разработанных во ВНИИЭМ. Характерным отличием периода минимума СА от периода максимума состоит в том, что в минимуме отсутствуют потоки СКЛ.

На рис. 3 приведены кривые ослабления дозы за сферическими экранами из алюминия различной массовой толщины (плотность алюминия равна 2,7 г/см³) для орбиты КА «Ионосфера» [5]. Обращаем внимание на то, что все спектры носят спадающий характер. Отметим, что первая расчётная точка относится к массовой толщине 0,014 г/см² (толщина 50 мкм). Для типичных полимеров она соответствует эквивалентной толщине 120 мкм, которая сравнима с толщиной лаков и эмалей, применяемых на поверхности КА. Очевидно, что необходима информация для потоков заряженных частиц с пробегом в полимерах порядка 10 мкм (для электронов это соответствует энергии 22 кэВ). Особенно критична эта информация для геостационарной орбиты, на которой плотность потока электронов с энергий 1 – 100 кэВ во время геомагнитной суббури возрастает на порядки и для электронов с энергией 20 кэВ может достигать 2 – 5 нА/см², т. е. $(1,2 – 3) \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Их длительность составляет порядка 3 ч, а частота появления близка к десяти событиям за год, так что интегральный поток таких электронов оказывается порядка $1,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [5 – 7].

На рис. 1 видно, что потоки протонов ЕРПЗ с энергией более 2 МэВ на орбите ГС практически отсутствуют. Поток протонов ЕРПЗ на ССО с вы-

сотой около 832 км более чем в три раза превышает поток протонов на орбите с высотой около 652 км, но потоки протонов СКЛ на орбитах с высотами 832 и 652 км практически совпадают (кривые 4 и 6 на рис. 1). Поток протонов с энергией около 0,1 МэВ ЕРПЗ на орбите ГС превышает аналогичный поток протонов на ССО с высотой 652 км более чем в 1000 раз.

На рис. 2 видно, что потоки электронов ЕРПЗ на орбите ГС в диапазоне энергий от 0,04 МэВ до нескольких МэВ превосходят потоки электронов на ССО. Так, поток электронов с энергией в 1 МэВ на орбите ГС превышает поток электронов с этой же энергией на ССО с высотой 652 км в 100 раз.

В табл. 1 приведены суммарные поглощённые дозы в кремнии в центре сферы из алюминия различной толщины для орбиты ГС и ССО с высотой 832 и 652 км для периодов максимума и минимума СА.

Поглощённая доза радиации дана в единицах рад. Один рад соответствует энергии в 100 эрг, поглощённой в 1 г вещества. Из табл. 1 следует, что поглощённая доза радиации внутри сферы из алюминия толщиной в 1 мм на орбите ГС почти в 100 раз превышает поглощённую дозу радиации на ССО.

Следует отметить, что на орбите ГС под экраном менее 6 мм алюминия поглощённая доза радиации в основном определяется потоками электронов ЕРПЗ, а под экраном более 6 мм поглощённая доза радиации определяется потоками частиц СКЛ и квантами тормозного электромагнитного излучения.

Плоская геометрия. Начнём наш анализ со случая протяжённого слоя полимера, находящегося в непосредственном контакте с внешней средой. В качестве модельного полимера рассмотрим полиэтилентерефталат (ПЭТФ), металлизированные плёнки которого (толщиной 3 – 5 мкм) использовались и по-прежнему используются для изготовления матов ЭВТИ. Радиационная стойкость этого полимера высока и составляет 200 Мрад на воздухе и 1000 Мрад в вакууме (критерий радиационной стойкости – снижение механической или электрической прочности в 2 раза) [1 – 3]. Плотность полимера 1,35 г/см³. У полипиромеллитимида, другого часто используемого в качестве материала ЭВТИ полимера (ППМИ, плотность 1,39 г/см³), радиационная стойкость ещё на порядок выше. Очевидно, что эти два полимера могут с успехом применяться на внешней поверхности аппарата без какой-либо защиты на всех трёх типовых орбитах.

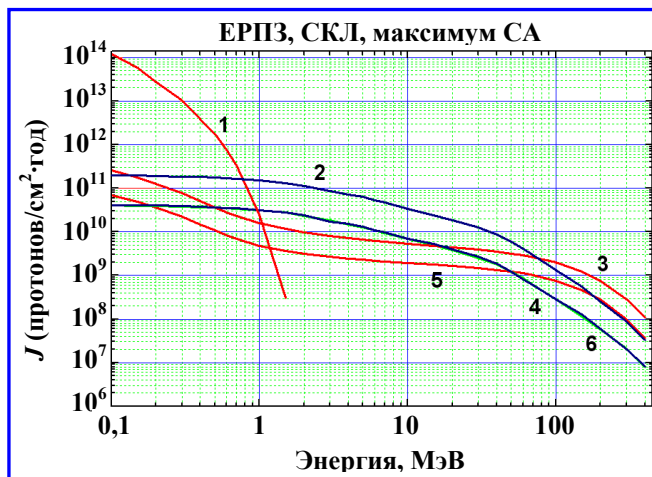


Рис. 1. Интегральные потоки протонов ЕРПЗ (красный цвет) и СКЛ (синий цвет) на орбите ГС (1, 2) и на ССО с высотами на экваторе и 832 км (3, 4) и 652 км (5, 6) в максимуме СА

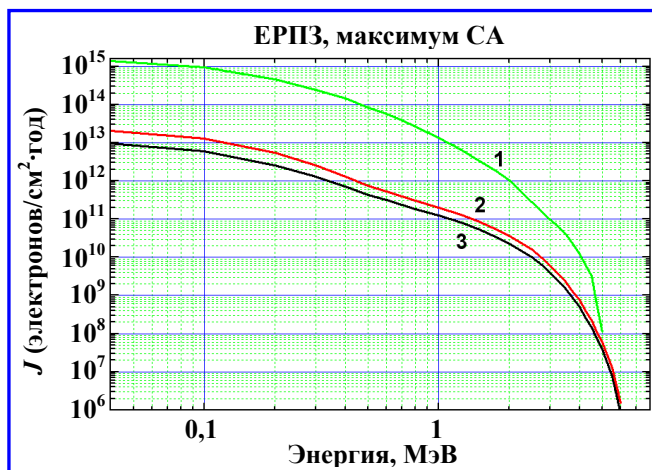


Рис. 2. Интегральные потоки электронов ЕРПЗ на орбите ГС (1) и на ССО с высотами на экваторе 832 км (2) и 652 км (3) в максимуме СА

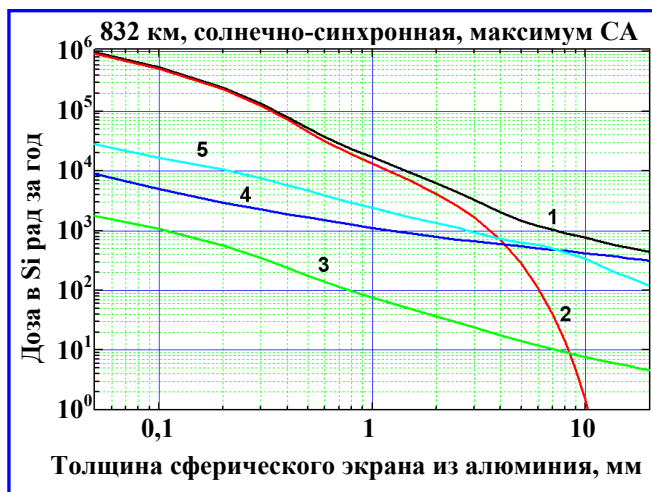


Рис. 3. Поглощённые дозы радиации на ССО с высотой на экваторе 832 км в максимуме СА в центре сферического экрана (поглощающее вещество Si). Суммарная доза (1), доза от электронов ЕРПЗ (2), от тормозного излучения (3), от протонов ЕРПЗ (4) и от протонов СКЛ (5)

Таблица 1

Суммарные поглощённые дозы в кремнии за год за различными защитами из алюминия для трёх орбит в максимуме и минимуме солнечной активности

Толщина Al		Полная поглощённая доза радиации (рад)					
		ГС		832 км		652 км	
мм	г/см ²	max	min	max	min	max	min
0,050	0,014	6,408E + 07	6,403E + 07	9,715E + 05	4,366E + 05	4,731E + 05	1,998E + 05
0,100	0,027	3,795E + 07	3,793E + 07	5,435E + 05	2,297E + 05	2,597E + 05	1,042E + 05
0,200	0,054	1,900E + 07	1,899E + 07	2,476E + 05	9,720E + 04	1,193E + 05	4,553E + 04
0,300	0,081	1,122E + 07	1,120E + 07	1,329E + 05	5,401E + 04	6,685E + 04	2,641E + 04
0,400	0,108	7,300E + 06	7,289E + 06	7,975E + 04	3,532E + 04	4,252E + 04	1,790E + 04
0,500	0,135	5,022E + 06	5,013E + 06	5,234E + 04	2,514E + 04	2,964E + 04	1,311E + 04
0,600	0,162	3,615E + 06	3,607E + 06	3,724E + 04	1,900E + 04	2,210E + 04	1,013E + 04
0,800	0,216	2,124E + 06	2,117E + 06	2,328E + 04	1,252E + 04	1,457E + 04	6,859E + 03
1,000	0,270	1,372E + 06	1,366E + 06	1,687E + 04	9,197E + 03	1,084E + 04	5,107E + 03
1,500	0,405	5,350E + 05	5,291E + 05	9,529E + 03	5,206E + 03	6,304E + 03	2,905E + 03
2,000	0,540	2,405E + 05	2,350E + 05	6,317E + 03	3,358E + 03	4,241E + 03	1,844E + 03
2,500	0,675	1,203E + 05	1,154E + 05	4,482E + 03	2,339E + 03	3,035E + 03	1,251E + 03
3,000	0,810	6,561E + 04	6,140E + 04	3,294E + 03	1,736E + 03	2,237E + 03	9,000E + 02
4,000	1,080	2,187E + 04	1,851E + 04	2,030E + 03	1,112E + 03	1,385E + 03	5,399E + 02
5,000	1,350	9,289E + 03	6,265E + 03	1,479E + 03	8,237E + 02	1,022E + 03	3,784E + 02
6,000	1,620	5,530E + 03	2,744E + 03	1,214E + 03	6,879E + 02	8,445E + 02	3,034E + 02
7,000	1,890	3,859E + 03	1,465E + 03	1,032E + 03	6,149E + 02	7,071E + 02	2,642E + 02
8,000	2,160	2,970E + 03	9,238E + 02	9,080E + 02	5,710E + 02	6,091E + 02	2,416E + 02
9,000	2,430	2,530E + 03	6,991E + 02	8,345E + 02	5,431E + 02	5,517E + 02	2,279E + 02
10,000	2,700	2,222E + 03	6,033E + 02	7,674E + 02	5,186E + 02	4,989E + 02	2,167E + 02
12,000	3,240	1,709E + 03	5,167E + 02	6,474E + 02	4,842E + 02	4,000E + 02	2,014E + 02
14,000	3,780	1,386E + 03	4,617E + 02	5,651E + 02	4,536E + 02	3,355E + 02	1,880E + 02
16,000	4,320	1,202E + 03	4,188E + 02	5,147E + 02	4,283E + 02	2,987E + 02	1,768E + 02
18,000	4,860	1,054E + 03	3,824E + 02	4,744E + 02	4,075E + 02	2,694E + 02	1,677E + 02
20,000	5,400	9,165E + 02	3,516E + 02	4,345E + 02	3,855E + 02	2,408E + 02	1,582E + 02

Ситуация с другими полимерами не столь однозначна. Если окажется, что средняя поверхностная доза в полимере на глубине 20 мкм (в этом случае необходима близкая экстраполяция табличных данных) превышает его радиационную стойкость в вакууме, то в такой ситуации возможны два подхода. При толщине слоя больше 200 мкм мы рассматриваем поверхностный слой полимера толщиной 40 мкм как защитный экран и пересчитываем дозу за ним. Если она окажется меньше его радиационной стойкости, то этот полимер в отсутствие адекватной замены может быть рекомендован для применения на КА. В противном случае необходима его замена или установка локальной защиты, например, в виде мата ЭВТИ.

Аксиальная геометрия. Наиболее типичная ситуация возникает при необходимости использования кабелей или проводов с изоляцией из политетрафторэтилена (ПТФЭ), радиационная стойкость которого очень низка (0,1 Мрад на воздухе и 1 Мрад в вакууме). Радиочастотные кабели РК-50 и РК 75, а также монтажные провода серии МС и МГТФ используют этот полимер в качестве материала изоляции. Замена ПТФЭ на полиэтилен низкой плотности (ПЭНП), как в радиочастотных кабелях или проводах МГШВ и КУПР, увеличивает их радиационную стойкость как минимум на порядок. Однако значительное снижение их класса нагревостойкости препятствует широкому использованию этих проводов и кабелей на внешней поверхности КА.

Естественно, что применение кабельных изделий на основе ПТФЭ требует внимательного рассмотрения. Сказанное выше относится в первую очередь к монтажным проводам без защитной оболочки. В случае радиочастотных кабелей ситуация несколько облегчается, поскольку у них имеется внешняя оболочка и слой металлической (чаще всего медной) оплётки, которые выступают в роли естественной защиты рабочей изоляции из ПТФЭ.

Анализ радиационной стойкости материалов антенно-фидерного устройства КА «Ионосфера»

Суммарная поглощённая доза радиации в открытом космическом пространстве для поглощающего вещества Si внутри сферы из алюминия массовой толщиной 0,014 г/см² (50 мкм) за 8 лет САС составляет $7,2 \cdot 10^6$ рад (7,2 Мрад). Именно эта цифра должна фигурировать в качестве критерия радиационной стойкости для полимерных материалов, предназначенных для применения на

внешней поверхности КА. Для полимеров с плотностью 1,3 г/см³ эта массовая толщина соответствует их толщине ≈ 100 мкм. При толщине поверхностного слоя полимера 40 мкм, выполняющего роль защитного экрана для более глубоких слоёв, поглощённая доза возрастёт до 20 Мрад (близкая экстраполяция табличных данных), но за счёт ограничения телесного угла облучения с 4π до 2π стерадиан эта цифра должна быть снижена в два раза. Полученное значение 10 Мрад можно использовать для оценки радиационной стойкости полимерных слоёв антенно-фидерного устройства (АФУ) толщиной порядка 200 мкм.

В табл. 2 приведены данные по радиационной стойкости использованных полимеров и конструкций из них.

Для успешной квалификации материалов и кабелей для применения на внешней поверхности КА устанавливается следующий критерий. Коэффициент запаса K по суммарной поглощённой дозе от заряженных частиц космического пространства, определяемый отношением предельно допустимой поглощённой дозы (показателя радиационной стойкости) к суммарной поглощённой дозе с учётом массовой толщины защиты, должен быть не менее 4.

Из табл. 1 видно, что $K \geq 4$ для всех полимерных материалов. Наибольшая трудность возникает при оценке возможности применения кабелей РК50-2-22 и РК50-4-21. Их радиационная стойкость при однородном облучении ограничивается радиационной стойкостью полимера изоляции ПТФЭ. На воздухе она составляет 0,1 Мрад (при высокой температуре снижается до 0,01 Мрад), а в вакууме – 1 Мрад. Принятая во всех вариантах АФУ защита кабелей стенками вибратора (1,5 мм) или трубкой ТКР такова, что доза излучений снижается до 0,06 Мрад как минимум.

Анализ рис. 4 показывает, что собственная защита изоляции из фторопласта Ф-4 состоит из оболочки (Ф-4МБ) толщиной 1,8 мм (плотность 2,15 г/см³) и слоя медных проволок толщиной 0,1 мм (суммарная массовая защита 0,45 г/см²), так что суммарный эффект защиты снижает дозу в изоляции из ПТФЭ до 0,02 Мрад. По проведённой оценке радиационной стойкости коэффициент запаса K для кабелей АФУ, проложенных по корпусу КА, с учётом ЭВТИ (суммарная массовая плотность 0,67 г/см²) и оболочки кабеля составляет величину не менее 5.

Радиационная стойкость соединителей (СР-50), изготовленных из металла, не ниже 10^4 Мрад и их применение не вызывает сомнения.

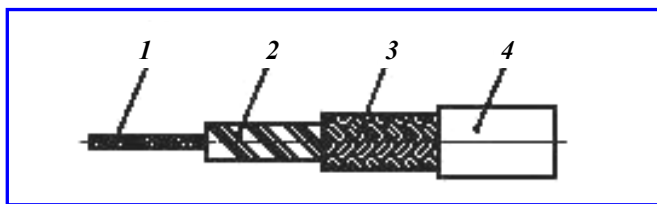


Рис. 4. Схематическая конструкция радиочастотного кабеля РК50-2-22: 1 – внутренний проводник из медных проволок (внешний диаметр 0,26 мм); 2 – изоляция из Ф-4 (внешний диаметр 2,2 мм); 3 – внешний проводник из медных посеребрённых проволок диаметром 0,1 мм; 4 – оболочка из фторопласта-4МБ (наружный диаметр кабеля 3,2 мм)

Проведённый анализ показывает, что все рассмотренные выше материалы, и кабели могут быть рекомендованы для применения на внешней поверхности КА «Ионосфера».

Анализ радиационной стойкости материалов антенно-фидерного устройства КА «Электро»

В данном случае речь идёт о геостационарной орбите со САС КА в четыре года за время с 1994 – 1998 гг., когда спутник был выведен из эксплуатации. Положительный опыт успешного четырёхлетнего САС на этой орбите свидетельствует о правильной квалификации

всех материалов, установленных на внешней поверхности КА. Перейдём теперь к анализу расчётных данных по радиационной стойкости этих материалов.

Максимальная поглощённая доза за защитой 50 мкм Al за четыре года САС для КА «Электро» составила 280 Мрад. Экстраполяция данных табл. 3 на толщину полимерной изоляции 50 мкм (~20 мкм Al) увеличит эту цифру ещё в 2,5 раза до 700 Мрад. Именно эту дозу получит слой открытого полимерного покрытия на поверхности КА, расположенный на глубине 50 мкм от поверхности. Для подобных покрытий толщиной менее 200 мкм эта поглощённая доза должна использоваться в качестве критерия радиационной стойкости при его квалификации для применения на аппарате.

В первую очередь в эту категорию попадают маты ЭВТИ, внешние слои которых получают эту или ещё большую дозу. Радиационная стойкость ПЭТФ или ППМИ, используемых в матах, (≥ 1000 Мрад) хотя и на пределе, но удовлетворяет приведённому выше критерию. При массовой плотности ЭВТИ $0,5 \text{ г/см}^2$ поглощённая доза за матом ЭВТИ снизится до 0,3 Мрад и окажется практически безопасной для большинства полимерных материалов, проводов и кабелей, в том числе и с изоляцией из Ф-4.

Таблица 2

Радиационная стойкость полимеров и конструкций из них при их однородном облучении (нормальные условия, среда облучения воздух) [1 – 3]

Материал	Радиационная стойкость, Мрад
Трубка 305-50,4	100
Трубка 203, ТКР4	100
Нить капроновая	60
Эмаль АК-512	100
Клей К300-61	>300
Виксинт У-4-21	>250
Полиимид ПИ-ПР20 (пластина, шайба)	>1000
Прессматериал ДСВ-2-Р-2М	>50
Стеклотекстолит СТЭФ-У и Вс-25	100
Стеклолакоткань ЛСКЛ-155	>100
Кабели РК50-4 (изоляция из ПТФЭ)	1 (вакуум, фиксированный монтаж)

Таблица 3

Материалы, использованные на внешней поверхности КА «Электро»

Классы материалов	Марки	Классы материалов	Марки
Эмали	ЭП-51 (чёрная) ЭП-140 (чёрная и белая) ЭП-572 ЭФ-1118 М	Компаунды	ЭЗК-9 ЭК-5 КП-34 К-119
Клеи	К-300Н ВК-9	Лаки	УР-231 АК-93
Стеклолакоткани	ЛСК-155/180 СПТ-3 Лента ЛЭТСАР	Краски маркировочные	ПМК МЧ-240 (чёрная)
Стеклотекстолит	ВФТС-2.5	Углепластики	Слокарбон-3у III Труба УСП-1
Прессматериал	АГ-3С	–	–

Внешние экраны радиационного холодильника, выполненные из односторонне-металлизированных плёнок ПЭТФ, также удовлетворяют приведённому выше критерию (со сделанными выше оговорками). В табл. 3 дан краткий перечень материалов, успешно отработавших на внешней поверхности КА «Электро» в течение четырёх лет САС.

Следует иметь в виду, что радиационная стойкость является лишь одним из факторов, ограничивающих применение полимерных материалов на внешней поверхности КА, особенно на геостационарной орбите. Два других фактора, а именно дифференциальная зарядка КА и газовыделение из полимеров в вакуум, создающие внешнюю атмосферу аппарата, должны получить адекватное рассмотрение и соответствующее инженерное решение, как это было сделано применительно к КА «Электро» [8, 9].

Выводы

Предложена методика квалификации полимерных материалов, проводов и кабелей для применения на внешней поверхности КА по их радиационной стойкости, учитывающая глубинный ход по-

глощённой дозы в них и использующая существующие данные по ослаблению доз за сферическими экранами из Al на орбитах КА, успешно прошедшая экспериментальную проверку на КА серии «Метеор» и «Электро».

Радиационные условия на ССО существенно менее жёсткие, чем на геостационарной орбите. Поглощённая доза радиации на геостационарной орбите в период максимума СА внутри сферы из Al толщиной 1 мм составляет величину более 1 Мрад в год, тогда как поглощённая доза радиации за тот же период на ССО – почти в 100 раз меньше.

Авторы благодарны д-ру техн. наук. В.П. Ходненко за ряд ценных замечаний по списку материалов для табл. 3.

Литература

1. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций / В. К. Князев, Н. А. Сидоров, В. Г. Курбаков [и др.]. – М. : Советское радио, 1976. – 568 с.
2. Радиационная стойкость органических материалов: справочник / В. К. Милинчук, В. И. Тупиков, Б. А. Брисман [и др.] ; под ред. В. К. Милинчука, В. И. Тупикова. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.

3. Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений / А. П. Тютнев, В. С. Саенко, Е. Д. Пожидаев, Н. С. Костюков. – М. : Наука, 2005. – 453 с.
4. Energy loss, range and bremsstrahlung yield for 10-keV to 100-MeV electrons in various elements and chemical compounds / L. Pages, E. Bertel, H. Joffre [et al.] // Atomic Data. – 1972. – Vol. 4. – P. 2 – 127.
5. Радиационные условия на орбите КА «Ионосфера» / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 123. – № 4. – С. 19 – 28.
6. Space charging currents and their effects on spacecraft systems / J. B. Reagan, R. E. Meyerott, E. E. Gaines [et al.] // IEEE Trans. Electrical Insul. – 1983. – Vol. 18. – № 3. – P. 354 – 365.
7. Радиационные условия на геостационарной орбите / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 117. – № 4. – С. 33 – 42.
8. Комплексное исследование влияния факторов космического пространства на работоспособность КА «Электро» / А. П. Тютнев, В. П. Ходненко, Н. В. Кузнецов [и др.] // Труды ВНИИЭМ. – М. : НПП ВНИИЭМ, 1998. – Т. 98. – С. 94 – 103.
9. Собственная внешняя атмосфера КА «Электро» и способы снижения её вредного воздействия / В. П. Ходненко, М. А. Мельниченко // Труды ВНИИЭМ. – М. : НПП ВНИИЭМ, 1998. – Т. 98. – С. 82 – 93.

Поступила в редакцию 11.01.2012

Андрей Павлович Тютнев, д-р физ.-мат. наук, ведущий научн. сотрудник.

Илья Владимирович Кочетов, инженер.

Владимир Тимофеевич Семёнов, начальник лаборатории.

Иннокентий Петрович Безродных, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник.

Т. (495) 333-20-00, (495) 366-38-38.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.