
УДК 621.383.51, 537.5

КРИТЕРИИ РАЗРУШАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВТОРИЧНЫХ ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ НА ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2024 г. В. В. Валиуллин¹, А. Б. Надирадзе^{1,*}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)”, Москва, Россия

*e-mail: nadiradze@mai.ru

Поступила в редакцию 11.09.2023 г.

После доработки 08.11.2024 г.

Принята к публикации 12.11.2024 г.

Одной из тенденций развития солнечной энергетики в космосе является увеличение рабочего напряжения солнечных батарей (БС) до 100 и более вольт. Это позволяет существенно снизить массу кабельной сети и преобразователей напряжения, однако сопряжено с риском возникновения вторичных дуговых разрядов (ВДР), способных привести к разрушению элементов конструкции и значительному снижению выходной мощности БС. В данной статье рассмотрены вопросы выбора критериев разрушающего воздействия ВДР на БС, позволяющие определить преобладающий механизм воздействия и оценить допустимое количество разрядов в каждой точке БС. Кратко рассмотрены методы экспериментального определения показателей разрушающего воздействия ВДР на высоковольтные БС, используемых в предложенных критериях.

Ключевые слова: высоковольтная солнечная батарея, космический аппарат, вторичные дуговые разряды, критерии разрушающего воздействия, показатели разрушающего воздействия

DOI: 10.31857/S0002331024060057

ВВЕДЕНИЕ

Одной из тенденций развития солнечной энергетики в космосе является увеличение рабочего напряжения солнечных батарей (БС) до 100 и более вольт. Это позволяет существенно снизить массу кабельной сети и преобразователей напряжения и, соответственно, увеличить массу полезной нагрузки космического аппарата (КА). В связи с этим тенденцию увеличения рабочего напряжения БС можно считать устойчивой, а применение высоковольтных солнечных батарей (ВБС) в составе КА — весьма перспективным [1].

Однако с увеличением рабочего напряжения растет и риск возникновения дуговых разрядов, способных привести к разрушению элементов конструкции и значительному снижению выходной мощности ВБС [2–6]. Поэтому одной из важнейших

проблем перехода на повышенное рабочее напряжение БС является обеспечение их устойчивости к негативному воздействию дуговых разрядов.

Дуговые разряды возникают между электродами ВБС, находящимися под достаточно большим напряжением и близко расположенными друг к другу. Однако самопроизвольное загорание дуговых разрядов на ВБС невозможно. Для того чтобы загорелась дуга, необходимо создать проводящую среду между электродами. Такая среда может быть создана в результате первичного электростатического разряда (ЭСР) или первичной дуги, возникающих при электризации внешних поверхностей КА под действием потоков магнитосферной плазмы [4, 5, 7, 8]. Дуга может загораться в плазме, генерируемой при ударе метеорных частиц или твердых частиц техногенного происхождения (“космический мусор”) [9, 10], в плазме электроракетного двигателя или в ионосферной плазме [11–17]. Учитывая необходимость инициирования (“поджига”), дуговые разряды между электродами ВБС обычно называют вторичными дуговыми разрядами (ВДР).

Дуговые разряды различных видов, включая вакуумные дуговые разряды, к которым относятся и ВДР, в настоящее время достаточно хорошо изучены [18–20]. Имеются руководящие документы [21–23], позволяющие учесть возможность возникновения ВДР при проектировании и испытаниях ВБС. Вместе с тем критерии стойкости ВБС к воздействию ВДР, принятые в большинстве действующих стандартов [21–23], не учитывают особенностей разрушающего воздействия ВДР на элементы конструкции ВБС, что существенно снижает качество интерпретации результатов испытаний и ограничивает возможность применения расчетных методов оценки стойкости ВБС к данному виду воздействия.

Согласно [22], ВДР условно делят на 3 класса исходя из продолжительности разряда (рис. 1).

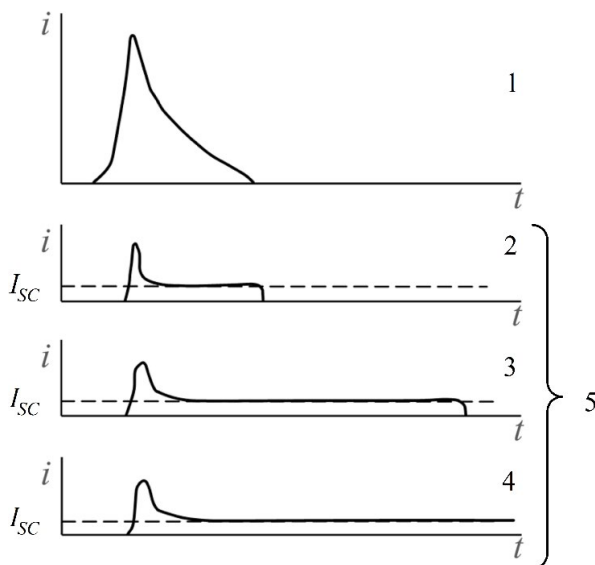


Рис. 1. Классификация ВДР по продолжительности разряда [22]: 1 — первичный разряд; 2 — неустойчивая дуга (NSA); 3 — временная устойчивая дуга (TSA); 4 — постоянная устойчивая дуга (PSA); 5 — вторичные дуги.

Вторичные дуги называют неустойчивыми (2 – NSA), когда дуга наблюдается только во время первичного разряда (1), являющегося инициатором ВДР.

Вторичные дуги называют устойчивыми (самостоятельный разряд), когда дуга наблюдается даже после завершения первичного разряда (3, 4).

Устойчивая дуга называется временной (3 – TSA), если она прекращается через некоторое время после окончания первичного разряда даже в том случае, если питание дуги все еще присутствует.

Устойчивая дуга называется постоянной (4 – PSA), если она не прекращается до тех пор, пока доступно внешнее питание.

Очевидно, что PSA-дуги недопустимы, поскольку они приведут либо к серьезным разрушениям конструкции ВБС, либо к значительным потерям мощности батареи. Исторически, название “постоянная” дуга произошло от того, что во время испытаний такая дуга прерывалась принудительно путем отключения питания. В связи с этим деление на TSA и PSA дуги является весьма условным, поскольку нет критерия, позволяющего их различить.

Хорошо известно [18], что вакуумный дуговой разряд может гореть только до тех пор, пока существует среда, через которую протекает ток разряда. Эта среда образуется в результате испарения и последующей ионизации материалов электродов и прилегающих к ним диэлектриков. Поэтому, как только запасы испаряющихся материалов будут исчерпаны, дуга погаснет. Погасание дуги может произойти и по причине ее природной неустойчивости, о чем будет сказано ниже. Наконец, дуга может прекратиться намного раньше, если произойдет перегорание проводника, подводящего электрическую энергию к месту горения дуги. Следовательно, PSA-дуг, горящих неопределенно долгое время, не существует в силу физической природы дугового разряда.

Временная дуга (TSA) может быть опасной только в том случае, если ее длительность достаточно велика, чтобы привести к разрушению элементов ВБС. Учитывая, что в течение срока активного существования (САС) КА в одном и том же месте таких дуг может произойти достаточно много, то даже относительно небольшие повреждения могут со временем накапливаться и приводить к критическим разрушениям элементов конструкции ВБС.

По-видимому, следуя этой логике, в стандарте [22] было принято, что допустимыми для конструкции ВБС являются только очень короткие, неустойчивые NSA-дуги, длительность горения которых не превышает 1–3 мкс. Предполагалось, что за столь короткое время повреждения не успеют развиваться или они будут настолько малы, что даже при очень большом количестве разрядов, реализуемых в течение САС, можно гарантировать, что критических разрушений элементов конструкции ВБС не произойдет. Напротив – устойчивые TSA и PSA дуги должны быть полностью исключены, поскольку они потенциально опасны и могут привести к необратимым разрушениям ВБС.

В данной статье предлагается использовать более гибкий критерий, который учитывает разрушающее воздействие дуговых разрядов на элементы конструкции ВБС. Этот критерий допускает возможность некоторого количества TSA-дуг и учитывает разрушения, возникающие в результате NSA-дуг. Допустимое количество дуг (любого типа) определяется исходя из повреждений, вызываемых одиночной дугой, накопительного характера повреждений и распределения дуговых разрядов по длительности горения. Кроме того, показано, что количество NSA-дуг, которое

можно допустить, не безгранично (хотя и велико). Поскольку дуговой разряд всегда сопровождается разрушениями электродов, их ресурс ограничен независимо от параметров и длительности горения дуги.

ПОКАЗАТЕЛИ РАЗРУШАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Независимо от того, в каком месте ВБС загорается дуга, она всегда ограничена током короткого замыкания I_{SC} фотоэлектрических генераторов, которые ее питают. В связи с этим можно считать, что все ВДР имеют ток $I_d \approx I_{SC}$. Для отдельных цепочек последовательно соединенных солнечных элементов (СЭ), получивших в англоязычной литературе название “стринг” (*string*), этот ток составляет 0.5–3 А. Для панели БС ток дуги может достигать 15–20 А, а для всей БС – 50–100 А и более.

Дополнительный вклад в ток разряда (в начальный момент времени) может вносить электрическая емкость СЭ, находящихся в контуре тока дуги. Однако энергия, накопленная на этой емкости, относительно невелика и в первом приближении ее можно не учитывать. Импульс тока, возникающий в начальный момент времени горения дуги и превышающий I_{SC} , имеет длительность порядка нескольких микросекунд, что позволяет не учитывать его при оценке повреждающего воздействия ВДР на ВБС.

Сильноточные длительные дуги с током до 100 А и более могут возникать в местах нарушения изоляции кабелей (например, при ударе метеорной частицы [9], после многократной циклической нагрузки или после локального пробоя в результате мощного ЭСР). Такие дуги обычно возникают между местами повреждения изоляции положительной шины БС и корпусом КА [22]. Хотя не исключены ситуации, когда дуга горит между двумя близкорасположенными сильноточными кабелями с разной полярностью. Поскольку в разряде начинает участвовать диэлектрик, механизм горения дуги будет существенно отличаться от классических вакуумных дуг [19, 24]. Поэтому обычные критерии разрушения к таким разрядам неприменимы. Но если такая дуга возникает, то разрушения от нее, как правило, являются фатальными.

Дуги с токами до 5–20 А могут возникать в местах соединения развязывающих диодов с положительной шиной панели БС. Такие дуги питаются от нескольких стрингов или от отдельной секции. Причиной их возникновения является повреждение изоляции развязывающих диодов. Разрушения от таких дуг менее критичны для КА, поскольку охватывают относительно небольшую часть ВБС. Однако и в этом случае потери мощности могут быть значительными.

Принципиально иной характер имеют повреждения открытых (не изолированных) электродов ВБС. К таким электродам относятся межсоединители СЭ и коммутационные шины. Дуговые разряды, возникающие на этих электродах, питаются от одного стринга, поэтому ток дуги не превышает 0.5–3 А. При таких токах развитие длительных дуг маловероятно (за исключением тех случаев, когда электрод контактирует с диэлектрическими материалами, способными интенсивно выделять газы). Вместе с тем именно на открытых электродах возникновение дуговых разрядов наиболее вероятно, поскольку разряды инициируются первичными ЭСР, постоянно возникающими на панелях БС.

Таким образом можно утверждать, что только открытые электроды ВБС подвергаются непрерывному, длительному воздействию ВДР [25]. Дуговые разряды

в кабельной сети единичны, носят ярко выраженный случайный характер (удар метеорита, накопление механических повреждений) и, как правило, являются следствием дефектов конструкции [26].

При рассмотрении разрушающего воздействия дугового разряда на открытые электроды ВБС следует разделять воздействие на отрицательные (катод) и положительные (анод) электроды. Это связано с тем, что механизмы разрушения этих электродов имеют принципиальные отличия.

Катод, независимо от тока и времени горения дуги, всегда подвержен эрозии, обусловленной функционированием эктонов [20]. Эрозия может быть вызвана эмиссией ионов, выбросом нейтральных частиц, а также капельной фазы [27]. Эмиссия нейтральных частиц невелика. В лучшем случае она составляет 1–3% от общей потери массы катода [28, 29], поэтому ее можно не учитывать. Доля капельной фазы может быть значительной. Она зависит от материала катода, тока разряда и характера движения катодного пятна. Удельная ионная эрозия катода γ , численно равная отношению $\Delta m/q$, где Δm – потеря массы катода, q – электрический заряд, перенесенный дугой, при значениях $q \leq 0.1$ Кл составляет для меди – 40, для вольфрама – 62, а для углерода – 15 мкг/Кл [20, 27, 30, 31]. При увеличении перенесенного заряда до 1000 Кл удельная эрозия меди возрастает всего в 5 раз – до 200 мкг/Кл, что говорит о консервативности этого параметра.

Катодом дуги на ВБС в большинстве случаев является каркас панели ВБС, соединенный с отрицательной шиной батареи. Поскольку каркас представляет собой массивную конструкцию с развитой поверхностью, его эрозия вряд ли окажется критичной для работы ВБС.

В ряде случаев дуговой разряд может возникнуть между электродами соседних СЭ с достаточно большой разностью потенциалов. Поскольку катодом такого разряда служат электроды СЭ, их разрушение необходимо учитывать при анализе.

Пусть катод представляет собой медную шинку прямоугольного сечения длиной L , шириной B и толщиной H , закрепленную своими концами на полупроводниковом кристалле СЭ. Тогда потеря массы за счет эрозии, соответствующая критическому разрушению шинки, составит:

$$\Delta M_k = \rho_k \vartheta_k LBH, \quad (1)$$

где ρ_k – плотность материала шинки; ϑ_k – критическая степень разрушения (эрозии) шинки, при которой происходит разрыв электрической цепи (можно предположить, что $\vartheta_k \approx 0.1 - 0.25$).

Соответственно, критерием разрушения катодной шинки будет условие:

$$t_d \geq t_k^* = \frac{\Delta M_k}{\gamma I_d}, \quad (2)$$

где t_d – суммарное время горения множества дуговых разрядов на данном катоде; t_k^* – максимально допустимое суммарное время горения дуговых разрядов; I_d – ток дуги (здесь принято, что ток дуги ограничен источником тока I_{SC} и является константой).

Для медной шинки с размерами $8 \times 2 \times 0.05$ мм при $I_d = 0.5$ А, $v_k \approx 0.25$ и $\gamma = 40$ мкг/Кл из (2) находим, что $t_k^* \approx 90$ с. Тогда количество дуговых разрядов, которое допускается в течение САС, составит:

$$N_k^* = \frac{t_k^*}{\tau_0}, \quad (3)$$

где τ_0 — средняя длительность горения дугового разряда.

Заметим, что при $\tau_0 \approx 2$ мкс, характерном для несамостоятельной NSA-дугои, N_k^* составит около 4.5×10^7 . Это на несколько порядков величины больше количества разрядов за САС, которое, по оценкам [7], измеряется десятками тысяч. К тому же эти разряды распределены на всей ВБС, в состав которой входят десятки тысяч шинок. Следовательно, разрушение катодных шинок за счет ионной эрозии при NSA-дугах действительно можно исключить.

Разрушение анода происходит, в основном, в результате теплового воздействия дуги. Физические процессы, протекающие на аноде, чрезвычайно сложны и многообразны. Наиболее детально они описаны в работах [18, 32, 33]. В рамках данной статьи будем считать, что тепловыделение происходит по всей поверхности анода, анодных пятен не образуется и возможность точечного прогорания анода исключена. Тогда суммарное тепловыделение на аноде (подвод тепла) будет равно [18]:

$$Q_+ = I_d (U_a + U_e + \phi), \quad (4)$$

где U_a — анодное падение ($U_a \approx 0 \dots 4$ В); U_e — температурный потенциал электронов в плазме ($U_e \approx 1$ В); ϕ — работа выхода электронов из металла анода (для меди $\phi = 4.15$ В). Согласно [32], эффективное анодное падение $U_a^{\text{эфф}} = U_a + U_e + \phi$ для большинства металлов составляет около 7.5 В.

Будем считать, что отвод тепла от шинки происходит только за счет излучения и теплопроводности. Теплоотводом за счет испарения можно пренебречь, поскольку разрушение анода происходит сразу после начала плавления, то есть гораздо раньше, чем начинается его интенсивное испарение. Полагая, что температура концов шинки, контактирующих с кристаллом СЭ, равна температуре СЭ, теплоотвод за счет теплопроводности составит:

$$Q_\lambda = 4\lambda (T_0 - T_1) \frac{BH}{L}, \quad (5)$$

где λ — коэффициент теплопроводности; T_1 — температура СЭ ($T_1 \approx 80^\circ\text{C}$); T_0 — температура в центральной точке шинки.

Теплоотвод излучением можно оценить по формуле:

$$Q_\epsilon = \epsilon \sigma T_0^4 LB, \quad (6)$$

где ϵ — степень черноты шинки (для металлических электродов $\epsilon \approx 0.5$); σ — постоянная Стефана — Больцмана.

Суммарный отвод тепла от шинки составит:

$$Q_- = Q_\lambda + Q_\epsilon. \quad (7)$$

Равновесную температуру в середине шинки T_0 находим, решая уравнение теплового баланса:

$$Q_+ - Q_- = 0. \quad (8)$$

Для указанных выше параметров из (8) находим, что $T_0 \approx 350^\circ\text{C}$. При такой температуре никаких разрушений шинки можно не опасаться независимо от длительности и количества разрядов. Следовательно, одним из условий критического воздействия ВДР на анод является превышение температуры анода некоторого предельно допустимого значения. Если исходить из условия сохранения целостности анода (не учитывая теплового воздействия на СЭ и изоляторы), то таким значением является температура плавления материала анода T_v , которая для меди составляет 1083°C .

Расчет по (4)–(8) показывает, что температура плавления T_v достигается при $I_d = I_a^* = 2.5$ А. Однако при токе разряда $I_d = I_a^*$ разрушения шинки не происходит, поскольку все подводимое тепло (19 Вт) отводится от шинки за счет теплопроводности (17 Вт) и излучения (2 Вт). Только при $I_d > I_a^*$ возникает избыточное тепловыделение $\Delta Q = Q_+ - Q_-$, которое может привести к плавлению материала шинки. Полагая, что при плавлении шинки происходит ее частичное разрушение, время до полного разрушения шинки можно оценить, как:

$$t_a^* \approx v_a M_S \frac{\Delta H_{\text{пл}}}{\Delta Q}, \quad (9)$$

где M_S – масса шинки; $\Delta H_{\text{пл}}$ – скрытая теплота плавления материала шинки; v_a – критическая степень расплавления анодной шинки, при которой наступает разрыв цепи (можно предположить, что $v_a \approx 0.1$ – 0.25).

При $\Delta Q \gg 0$ минимальное время, необходимое для нагрева шинки до температуры плавления (без учета отвода тепла), составит:

$$\tau_a^* \approx \frac{M_S}{Q_+} C_p (T_v - T_1), \quad (10)$$

где C_p – теплоемкость материала шинки.

Поскольку плавление шинки может происходить небольшими порциями, то суммарное время теплового воздействия дугового разряда на анод t_a^* может быть накоплено за несколько разрядов. В этом случае можно говорить о накопительном эффекте воздействия ВДР на анодные шинки.

Таким образом, условиями разрушения анода являются:

$$I_d > I_a^*, \quad (11a)$$

$$\tau_d > \tau_a^*, \quad (11b)$$

$$t_d = \sum (\tau_d - \tau_a^*) > t_a^*, \quad (11b)$$

где t_d – суммарное время теплового воздействия ВДР, при котором шинка нагрета до температуры плавления.

Разряд, при котором становится возможным частичное разрушение анода (выполняются условия 11а и 11б), в дальнейшем будем называть “разрушающим” дуговым разрядом. Для полного разрушения анода необходимо чтобы было выполнено условие (11в). Это возможно при одном длительном или при нескольких коротких разрядах.

Согласно (9) и (10), при токе разряда $I_d = 3.5$ А время нагрева анода до температуры плавления составит $\tau_a^* \approx 0.12$ с, а время до полного разрушения анода — $t_a^* \approx 0.023$ с. Заметим, что аккуратный численный расчет нагрева шинки дает $\tau_a^* \approx 0.21$ с, что, с учетом имеющейся неопределенности в отношении конструкции шинок и СЭ, незначительно отличается от значения, полученного по (10). Для конкретной конструкции шинки расчеты параметров τ_a^* и t_a^* могут быть выполнены с применением известных численных методов с учетом распределения температуры по длине шинки, конструкции СЭ и его окружения.

Вместе с тем при $I_d = 3.5$ А разрушение катодной шинки за счет ионной эрозии произойдет за время $t_k^* \approx 12$ с. Это наводит на мысль о том, что среди всех возможных видов воздействия ВДР существует один преобладающий вид воздействия, который и приводит к критическому разрушению элементов конструкции ВБС.

Для полноты картины необходимо рассмотреть тепловое разрушение полупроводника и примыкающих к электродам диэлектриков. Получить количественную оценку этих эффектов без привязки к конкретной конструкции довольно сложно, поэтому в рамках данной статьи ограничимся только качественной картиной разрушения.

Очевидно, что тепловые эффекты имеют пороговый характер. Для образования дефектов в кристалле полупроводника или пиролиза изоляторов необходимо, чтобы температура материала превысила некоторое критическое значение T_{max} . Условием достижения этой температуры является достижение критического значения тока дуги I_h^* , при котором равновесная температура материала равна T_{max} . В силу инерционности тепловых процессов для нагрева материала до этой температуры всегда требуется некоторое время τ_h^* . После этого требуется еще некоторое время t_h^* , необходимое для возникновения критических изменений в материалах. То есть, как и в случае с анодом, здесь имеется три ограничения по I_h^* , τ_h^* и t_h^* .

Исходя из этого, обобщенный критерий разрушающего воздействия ВДР на ВБС можно записать в виде:

$$I_d > I_{i,j}^*, \quad (12a)$$

$$\tau_d > \tau_{i,j}^*, \quad (12б)$$

$$t_d = \sum (\tau_d - \tau_{i,j}^*) > t_{i,j}^*, \quad (12в)$$

где нижним индексом i обозначается вид (механизм) воздействия, а индексом j — разрядный промежуток на электроды которого производится воздействие.

Для каждого разрядного промежутка и для каждого вида воздействия может быть определен вектор параметров $\theta_{i,j} = (I_{i,j}^*, \tau_{i,j}^*, t_{i,j}^*)$, позволяющий определить

преобладающий механизм воздействия и оценить его последствия для ВБС в зависимости от места локализации и параметров дуговых разрядов. Разрушение катода за счет эрозии определяется тройкой параметров $(0, 0, t_k^*)$.

ДОПУСТИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ

Экспериментальные исследования [19] и ряда других авторов показывают, что длительность горения дуги τ_d является случайной величиной, подчиняющейся распределению, вида:

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{\tau_d}{\tau_0}\right), \quad (13)$$

где N_0 – общее количество разрядов (за некоторое время наблюдений); N – количество разрядов с временем горения большим, чем τ_d ; τ_0 – среднее время горения дуги.

При этом среднее время горения дуги τ_0 экспоненциально растет с увеличением тока разряда [19]:

$$\tau_0 = \tau_{th} \exp\{\psi \cdot (I_d - I_{th})\}, \quad (14)$$

где I_d – ток дугового разряда; I_{th} – пороговый ток дуги (ток отсечки [19]); τ_{th} – средняя продолжительность горения дуги при $I_d = I_{th}$; ψ – константа, численно равная тангенсу угла наклона зависимости $\tau_0(i)$.

В работе [34] дается весьма убедительное теоретическое объяснение зависимостей (13) и (14) на основании эктонной модели дугового разряда. Основная идея этой модели состоит в том, что на поверхности катода появляются микровзрывы металла, обусловленные большой концентрацией энергии за счет джоулевого разогрева. Эти микровзрывы сопровождаются испусканием порций электронов в течение ~ 10 нс в количестве $10^{11} - 10^{12}$ штук. Плазма, создаваемая этими взрывами, взаимодействует с твердой и жидкой поверхностью металла катода и приводит к новым микровзрывам. Таким образом, имеет место процесс самоподдержания дугового разряда, в котором реализуется “эстафетный” режим функционирования эктонов. Если по каким-то причинам передача “эстафеты” не происходит, наблюдается самопроизвольное погасание дуги.

Согласно эктонной модели, физической причиной неустойчивости вакуумной дуги является конечное время жизни эктона и связанная с этим цикличность процессов в катодном пятне вакуумной дуги. Катодное пятно вакуумной дуги состоит из множества отдельных ячеек. Каждая ячейка переносит ток, который не превышает удвоенного значения порогового тока дуги I_{th} [34].

Отметим, что детальные исследования в части определения I_{th} и зависимостей $\tau_0(I_d)$ различных материалов проводились И.Г. Кесаевым [19], Дж. Фаррелом [18], Р.П.П. Смиитсом [35], П.С. Михайловым [36] и многими другими авторами. Типичные зависимости $\tau_0(I_d)$ для ряда материалов приведены на рис. 2 [18], а значения тока отсечки I_{th} в зависимости от параметра $-T_b \sqrt{\lambda}$, где T_b – температура плавления материала, λ – теплопроводность материала, на рис. 3 [19].

В этих работах было показано, что устойчивость дугового разряда определяется, в основном, процессами у катода. Поэтому такие параметры как длина дуги,

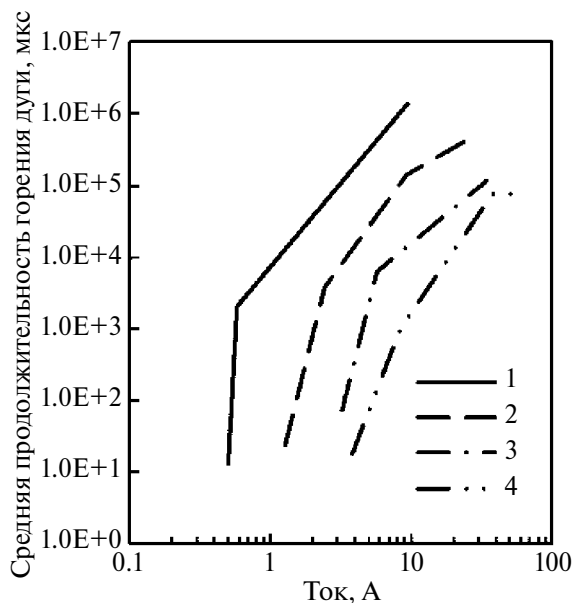


Рис. 2. Средняя продолжительность горения дуги для различных металлов: 1 – цинк; 2 – серебро; 3 – медь; 4 – вольфрам [18].

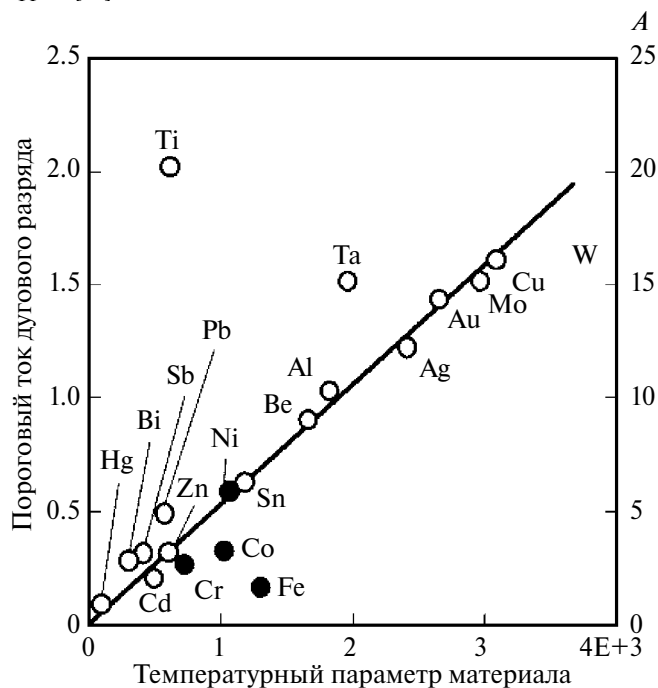


Рис. 3. Пороговые токи дугового разряда для различных материалов катода от температурного параметра материала $T_b \sqrt{\lambda}$. Зачерненными кружками отмечены результаты измерений для ферромагнитных металлов и кобальта. Ось ординат для них указана справа [19].

площадь катода и способ “поджига” не оказывают существенного влияния на устойчивость горения дуги.

Параметр ψ в формуле (14) является функцией температуры кипения материала катода [19]. Для ртутных катодов он в несколько раз больше, чем для вольфрамовых. Кривая $\tau_0(I_d)$ может иметь два или три прямолинейных участка, что обусловлено, по-видимому, плавлением и испарением материала катода. У ртутного катода в точке плавления (-39°C) наблюдается резкое уменьшение наклона ψ на 2–3 порядка величины. Это связано с тем, что на поверхности жидкого катода образуется “лужица” расплавленного металла, которая не содержит неровностей, являющихся местами зарождения эктонов.

Следует так же отметить, что появление газов в разрядном промежутке вызывает улучшение устойчивости дугового разряда [19, стр. 90], что, по-видимому, связано с увеличением концентрации плазмы. Этот фактор необходимо учитывать, когда в процессе горения дуги происходит пиролиз изоляторов, сопровождающийся интенсивным газовыделением. Если устойчивость разряда улучшается, то среднее время горения дуги возрастает, а значит возрастает вероятность критических разрушений элементов ВБС.

Как было показано в [34], ячейка катодного пятна имеет конечное время жизни t_c , которое называется циклом. Цикл состоит из двух стадий. Первая стадия — это время t_e , в течение которого происходит непосредственное функционирование эктона. Вторая стадия меньшей длительности t_i , в течение которой происходит инициирование нового эктона взамен исчезнувшего. Следовательно, вероятность того, что эктона нет, равна:

$$\alpha = \frac{t_i}{t_e + t_i}, \quad (15)$$

а того, что эктон функционирует:

$$\beta = 1 - \alpha. \quad (16)$$

Если ток дуги меньше $2I_{th}$, то в катодном пятне будет функционировать только одна ячейка, в которой то исчезает, то возникает новый эктон. Этот режим соответствует несамостоятельному дуговому разряду, о котором говорилось выше (NSA-дуга). Плазма первичного ЭСР иницирует первый эктон. Но в силу ограничения по току разряда, плазмы, которая будет создана этим эктоном, окажется недостаточно для инициации следующего эктона. Поэтому, как только исчезнет плазма первичного ЭСР, дуга погаснет.

При токе дуги $I_d \gg 2I_{th}$ количество ячеек:

$$n = \frac{I_d}{2I_{th}} \gg 1, \quad (17)$$

а среднее время горения дуги [34]:

$$\tau_0 = \frac{t_c}{\alpha^n}. \quad (18)$$

В общем случае параметры t_c и α должны быть определены экспериментально. Для вольфрама и меди $t_c \approx 30$ нс, а $\alpha \approx 0.2$ [34].

Таким образом, распределение дуговых разрядов по длительности горения характеризуется двумя параметрами – τ_0 и N_0 . При этом параметр τ_0 является характеристикой устойчивости катодных процессов, а N_0 – характеристикой внешнего воздействия (фактически – частотой импульсов “поджига” и длительностью экспозиции).

Очевидно, что параметры τ_0 и N_0 для каждого разрядного промежутка будут иметь свои индивидуальные значения $\tau_{0,j}$ и $N_{0,j}$.

Оценим для j -го разрядного промежутка предельно допустимое количество разрядов N_j^* , превышение которого может привести к критическим разрушениям.

Поскольку имеется несколько возможных механизмов воздействия, величину N_j^* можно определить как:

$$N_j^* = \min_{i \in (I_{i,j} > I_{i,j}^*)} \{N_{i,j}^*\}, \quad (19)$$

где $N_{i,j}^*$ – предельно допустимое количество разрядов по i -му механизму воздействия. В (19) учтено, что, если $I_{i,j} \leq I_{i,j}^*$, повреждений не возникает и i -ый механизм воздействия можно исключить из рассмотрения.

При $I_{i,j} > I_{i,j}^*$ количество разрядов, отвечающих условию (12б), будет равно:

$$N_{i,j} = N_{i,j}^* \exp\left(-\frac{\tau_{i,j}^*}{\tau_{0,j}}\right). \quad (20)$$

Суммарное время горения дуговых разрядов, длительностью $\tau_d > \tau_{i,j}^*$ составляет:

$$t_{sum,i,j} = N_{i,j} \cdot (\tau_{0,j} + \tau_{i,j}^*), \quad (21)$$

а суммарное время теплового (разрушающего) воздействия дуги:

$$t_{i,j} = N_{i,j} \cdot \tau_{0,j} = t_{i,j}^*. \quad (22)$$

Тогда, из (20, 21) и условия (12в) находим, что

$$N_{i,j}^* = \frac{t_{i,j}^*}{\tau_{0,j}} \exp\left(\frac{\tau_{i,j}^*}{\tau_{0,j}}\right). \quad (23)$$

Для рассмотренного выше примера при $I_d = 3,5$ А и $\tau_0 = 20$ мкс [25] из (23) находим, что $N_k^* = 6 \times 10^5$, а $N_a^* \gg N_k^*$. Это значит, что несмотря на то, что время теплового разрушения анода $t_a^* \ll t_k^*$, вероятность разрушения анода исчезающе мала в силу того, что для этого необходимо, чтобы длительность разряда превысила время нагрева анода до температуры плавления $\tau_a^* \approx 0.1$ с. Следовательно, для рассмотренного примера преобладающим механизмом воздействия является ионная эрозия катода, которая происходит при любой длительности разряда.

Рассмотрев все возможные механизмы воздействия, можно найти предельно допустимое количество разрядов N_j^* , превышение которого приведет к критическому разрушению элементов рассмотренного разрядного промежутка. Это значит,

что обобщенным критерием разрушающего воздействия ВДР на ВБС может быть условие:

$$N_{0,j} > N_j^*. \quad (24)$$

Отметим, что значительно меньшее количество разрядов требуется для возникновения термических разрушений полупроводника и прилегающих к электроду диэлектрических материалов. Это связано с меньшими значениями критической температуры и увеличением средней длительности горения дуги в следствие газо-выделения нагретых изоляторов. Однако и в этом случае для оценки допустимого количества разрядов могут быть применены соотношения (19), (23) и (24) с соответствующим набором параметров.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Возможность практического применения предлагаемых критериев определяется прежде всего возможностью определения показателей, которые в них используются. Здесь можно выделить три основные группы показателей — это показатели устойчивости ВДР ($\tau_{0,j}$), показатели разрушающего воздействия ВДР на ВБС ($\theta_{i,j}$) и показатели внешнего воздействия магнитосферной плазмы на ВБС ($N_{0,j}$).

Как отмечалось выше, показатели устойчивости ВДР ($\tau_{0,j}$) в силу их физической природы не зависят от способа инициирования и интенсивности инициирующих импульсов, хотя зависят от тока разряда. Поэтому при определении этих показателей можно применять методы ускоренных испытаний, обеспечивающие максимально быстрый набор необходимой статистики за счет увеличения частоты или интенсивности импульсов “поджига” дуги.

Отметим, что в работах [25, 37, 38] подробно рассмотрены процедуры проведения экспериментов по набору статистического материала и их последующей обработки. Результаты этих работ включены в стандарт [22] и являются руководством к действию при проведении испытаний ВБС на стойкость к воздействию ВДР.

Экспериментальное определение вектора $\theta_{i,j} = (I_{i,j}^*, \tau_{i,j}^*, t_{i,j}^*)$ предполагает разрушение образцов, исключающее их повторное использование. Учитывая высокую стоимость образцов и их ограниченное количество, для определения этих параметров наиболее рациональным представляется проведение испытаний при увеличенном токе разряда, позволяющим исключить накопительные эффекты и достичь разрушения образца при одиночном разряде (аналогичный подход применялся в [25]). Тогда, зная параметры этого разряда можно оценить $\theta_{i,j}$. Одновременно может быть получена информация о преобладающем механизме воздействия.

Более экономичным и точным является применение математических моделей разрушающего воздействия ВДР на ВБС, позволяющих по конкретным конструктивным параметрам разрядных промежутков определить $\theta_{i,j}$. Такие модели экстремально сложны и требуют тщательной экспериментальной проверки. Однако в настоящее время уже существуют подходы и математические модели, позволяющие решить подобные задачи [39].

Параметр $N_{0,j}$, относящийся к третьей группе показателей, определяется условиями функционирования КА и не может быть получен в прямом лабораторном эксперименте. Поэтому для оценки $N_{0,j}$ следует использовать расчетно-теоретические

методы (например, изложенные в [7]). Как правило, условия функционирования (функция распределения частиц магнитосферной плазмы и ее вариации) априори известны. Поэтому в лабораторном эксперименте достаточно получить зависимость частоты возникновения ВДР от параметров воздействия. Поскольку полностью смоделировать их в условиях стенда невозможно, следует опираться на некоторые характерные величины, которые можно проконтролировать в эксперименте. Это могут быть, например, плотность тока электронов и величина дифференциальной разности потенциалов в тройных точках. Измерив частоту возникновения ВДР в зависимости от этих параметров, можно оценить N_{0j} , которая будет реализована в условиях летной эксплуатации КА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены критерии разрушающего воздействия ВДР на элементы конструкции ВБС. Показателями разрушающего воздействия ВДР на ВБС являются ток разряда, длительность разряда и суммарное время теплового воздействия разряда на элементы разрядного промежутка. Данный набор показателей характеризует конкретный механизм воздействия для конкретного разрядного промежутка. При наличии данных о частоте и средней длительности дуговых разрядов предложенный критерий позволяет выбрать преобладающий механизм воздействия и оценить допустимое количество разрядов. Показано, что имеется три группы показателей, а именно, показатели устойчивости ВДР, показатели разрушающего воздействия ВДР на ВБС и показатели внешнего воздействия на ВБС. Показатели каждой группы определяются разными способами, позволяющими минимизировать затраты материальных и временных ресурсов на проведение испытаний. Рассмотрены основные способы экспериментального и расчетно-теоретического определения показателей воздействия. В частности, отмечается, что применение современных математических моделей для расчета показателей разрушения позволяет существенно сократить стоимость модельных испытаний и повысить точность прогнозирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goebel D.M., Filimonova O.S.* High Voltage Solar Array Development for Space and Thruster-Plume Plasma Environments // IEEE Transactions on Plasma Science, 2022. V. 50. № 3. P. 721–730. DOI: 10.1109/TPS.2022.3147424
2. *Акишин А.И.* Снижение мощности солнечных батарей искусственных спутников Земли под воздействием электрических разрядов // Материалы авиационной и космической техники. Перспективные материалы, 2008. № 4. С. 22.
3. *Акишин А.И.* Электроразрядные сбои в космических аппаратах в зоне космических излучений // Перспективные материалы, 2010. № 2. С. 27–32.
4. *Ferguson D.C., HiHard G.B., Vayner B.V., Galofaro J.T., Lyons V.* High Voltage Space Solar Arrays. 53rd International Astronautical Congress. The World Space Congress, 2002.
5. *Vayner B.V., Galofaro J.T., Ferguson D.C.* Experimental Study of Arcing on High-Voltage Solar Arrays. 17th Space Photovoltaic Research and Technology Conference. Cleveland. Ohio, 2002. P. 16.

6. Летин В.А., Акишин А.И., Бардина Н.М., Заявлин И.Р., Князев Б.Н., Спиглазов А.М., Тютрин Ю.И., Эвенов Ю.И. Возникновение дугового разряда между участками солнечных батарей в вакууме // Гелиотехника, 1990. № 1. С. 75–76.
7. Cho M., Kawakita S., Nakamura M., Takahashi M., Sato T., Nozaki Y. Number of Arcs Estimated on Solar Array of a Geostationary Satellite // Journal of Spacecraft and Rockets, 2005. V. 42. № 4. P. 740–748. DOI: 10.2514/1.6694
8. Бабкин Г.В., Гостищев Э.А., Смекалин Л.Ф., Шошин Э.Б., Ягушкин Н.И. Условия возникновения низковольтных электрических дуг между элементами солнечных батарей при радиационной электризации космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение, 2003. Т. 30. № 1. С. 75–83.
9. Siguier J.-M., Inguibert V., Murat G., Payan D. Secondary arcing triggered by hypervelocity impacts on solar panel rear side cables with defects – Comparison with laser impacts // IEEE Transactions on Plasma Science. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. V. 45. № 8. P. 1880–1886. DOI: 10.1109/TPS.2017.2686602
10. Акишин А.И. Космическое материаловедение. Методическое и учебное пособие. М: НИИЯФ МГУ, 2007. С. 209.
11. Мещеряков В.П. Взрывная эрозия сильноточных контактов и электродов. Ульяновск: УлГТУ, 2011.
12. Tverdokhlebova E.M., Korsun A.G., Garkusha V.I., Strashinsky V.A., Gabdullin F.F., Tverdokhlebov S.O. Influence of Space Propulsions and Plasma Sources on Electric-Discharge Phenomena on the ISS. Proceedings of the 4th International Spacecraft Propulsion Conference (ESA SP-555). Chia Laguna (Cagliari). Sardinia. Italy, 2004.
13. Tverdokhlebova E.M., Borisov B.G., Korsun A.G., Kozyrev N., Gabdullin F.F. Simulation of near-electrode processes of a electric discharge in the ISS environment. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 2006. DOI: 10.2514/6.2006-872
14. Gabdullin F.F., Korsun A.G., Lavrenko E.G., Mitroshin A.S., Tverdokhlebova E.M. The Plasma Plume of the ISS Plasma Contactor Unit under the Effect of the Geomagnetic Field. Presented at the 30th International Electric Propulsion Conference. Florence. Italy, 2007.
15. Надирадзе А.Б., Шапошников В.В., Максимов И.А., Иванов В.В., Кочура С.Г. Воздействие плазмы электроракетных двигателей на бортовое высоковольтное оборудование. Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 40-летию запуска на орбиту навигационного КА “Космос-192” и 25-летию запуска первого КА “Глонас”. г. Железногорск. 10–14 октября. 2007 / под общ. ред. Н. А. Тестоедова. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2007.
16. Carruth M.R., Vaughn J.A., Bechtel R.T., Gray P.A. Electrical Breakdown of Space Station Freedom Surfaces. 30th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit. Reno. NV, 1992. P. 1–7.
17. Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. Москва. Машиностроение, 2008.
18. Лафферти Дж. [Lafferty J.M.]. Вакуумные дуги / под ред. Дж. Лафферти; пер. с англ. А.В. Елецкого, Е.З. Меплихова, А.А. Радцига; под ред. В.И. Раховского. М.: Мир, 1982. С. 432.
19. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. Москва: Наука, 1968.
20. Месяц Г.А. Эктон – лавина электронов из металла // УФН, 1995. Т. 165. № 6. С. 601–626. DOI: 10.3367/UFNr.0165.199506a.0601

21. ECSS-E-ST-20-06C. Space engineering. Spacecraft charging. ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk. The Netherlands, 2008.
22. ISO 11221:2011. Space Systems – Space Solar Panels – Spacecraft Charging Induced Electrostatic Discharge Test Methods.
23. Okumura T., Ninomiya S., Masui H., Toyoda K., Imaizumi M., Cho M. Solar cell degradation due to ESD for international standardization of solar array ESD test. Proceedings of the 10th Spacecraft Charging Technology Conference, 2007.
24. Ширковец А.И., Губаев Д.Ф. Математическая модель горения однофазной дуги в изоляции силовых кабелей с графической интерпретацией развития пробоя на основе нелинейного сопротивления дугового канала // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2012. № 9–10. С. 121–134.
25. Cho M., Kitamura K., Ose T., Masui H., Toyoda K. Statistical Number of Primary Discharges Required for Solar Array Secondary Arc Tests // Journal of Spacecraft and Rockets, 2009. V. 46. № 2. P. 438–448. DOI:10.2514/1.37798
26. Gerlach L. Post-Flight Investigation Programmes Of Recently Retrieved Solar Generators. Proceedings of the 13th Space Photovoltaic Research and Technology Conference (SPRATXIII). NASA Lewis Research Center Cleveland. Ohio, 1994, P. 269–283.
27. Месяц Г.А., Беренгольц С.А. Механизм генерации аномальных ионов вакуумной дуги // УФН, 2002. Т. 172. № 10. С. 1113–1130. DOI: 10.3367/UFNr.0172.200210a.1113
28. Tuma D.T., Chen C.L., Davies D.K. Erosion products from the cathode spot region of a copper vacuum arc // J. Appl. Phys., 1978. V. 49. № 7. P. 3821. DOI: 10.1063/1.325386
29. Daalder J.E. Components of cathode erosion in vacuum arcs // J. Phys. D: Appl. Phys., 1976. V. 9. № 16. P. 2379. DOI: 10.1088/0022-3727/9/16/009
30. Daalder J.E. Erosion and the origin of charged and neutral species in vacuum arcs. // J. Phys. D: Appl. Phys., 1975. V. 8 № 14. P. 1647. DOI: 10.1088/0022-3727/8/14/009
31. Андерс А., Окс Е.М., Юшков Г.Ю., Савкин К.П., Браун Я., Николаев А.Г. Определение удельной ионной эрозии катода вакуумной дуги на основе измерения полного ионного тока из разрядной плазмы // Журн. технической физики, 2006. Т. 76. № 10. С. 57–61.
32. Осадин Б.А. Эрозия анода при сильноточном разряде в вакууме // ТВТ, 1965. Т. 3. № 6. С. 914–919.
33. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившейся ток / под ред. Л.А. Сена и В.Е. Голанта. М.: Наука. 1971. С. 543.
34. Беренгольц С.А., Месяц Г.А. Самопроизвольное погасание дуги в эктонной модели // Письма в ЖТФ, 2001. Т. 27. № 6. С. 82–85.
35. Smeets R.P.P. Low-current behaviour and current chopping of vacuum arcs. [Phd Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Electrical Engineering]. Technische Universiteit Eindhoven, 1987. DOI: 10.6100/IR264618
36. Михайлов П.С., Музюкин И.Л., Мамонтов Ю.И., Уйманов И.В., Земсков Ю.А., Беренгольц С.А. Измерение порогового тока вакуумной дуги для наноструктурированного вольфрама. Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Tomsk. Russia, 2022. P. 886–889. DOI: 10.56761/EFRE2022.C3-O-024701
37. Cho M., Goka T. Japanese Practices of Solar Array ESD Ground Tests. 9th Spacecraft Charging Technology Conference. Japan Aerospace Exploration Agency. Tsukuba. Japan, 2005.

38. *Cho M., Kim J.-H., Hosoda S., Nozaki Y., Miura T., Iwata T.* Electrostatic Discharge Ground Test of a Polar Orbit Satellite Solar Panel // IEEE Transactions on Plasma Science, 2006. V. 34. № 5. P. 2011–2030. DOI: 10.1109/TPS.2006.881935
39. *Khalyutin S., Starostin I., Agafonkina I.* Generalized Method of Mathematical Prototyping of Energy Processes for Digital Twins Development // Energies, 2023. V. 16. № 4. P. 1933. DOI: 10.3390/en16041933

Criterion of Damaging Effect Caused by Secondary Arc Discharge Impact Onto High-Voltage Solar Batteries of the Spacecraft

V. V. Valliulin^a, A. B. Nadiradze^{a, *}

^aMoscow Aviation Institute (MAI), Moscow, Russia

^{}e-mail: nadiradze@mai.ru*

One problem of space solar power engineering is how to increase the solar batteries (SB) operating voltage up to 100 V and higher. It makes possible to decrease greatly the cabling mass and the mass of voltage transducers, but it can cause secondary arc discharges (SAD) able to destroy SB structure and to decrease SB output power. In the present paper we analyse how to choose criteria of damaging effect caused by secondary arc discharge impact onto SB, which make possible to determine the prevalent impact mechanism, and to estimate permissible number of discharges in each point of the solar battery. In brief, we examine methods for determining experimentally criteria of damaging effect caused by SAD impact to SB.

***Keywords:** high-voltage solar battery, spacecraft, secondary arc discharges, damaging effect criteria, damaging effect indicators*