

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 621.384.62

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФАКТОРОВ
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

© 2022 г. М. П. Калаев^а, А. В. Родина^а, А. М. Телегин^{а,*}

^а Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
(Самарский университет)

Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34

*e-mail: talex85@mail.ru

Поступила в редакцию 15.04.2022 г.

После доработки 21.04.2022 г.

Принята к публикации 19.05.2022 г.

Описана конструкция стенда для исследования воздействия высокоскоростных микрочастиц на энергетические характеристики солнечных батарей путем анализа их вольт-амперной характеристики. Приведены результаты экспериментальных исследований деградации солнечных батарей, проведенных на ускорителе микрочастиц. После воздействия потока частиц в количестве 12000 штук размером 2–5 мкм и скоростями 1–8 км/с на площадь 8 см² зарегистрировано уменьшение тока короткого замыкания солнечной батареи на 0.06%.

DOI: 10.31857/S0032816222050251

ВВЕДЕНИЕ

По мере увеличения срока эксплуатации современных космических аппаратов (КА) возникает необходимость в разработке новых видов оборудования, обновлении элементной базы бортовой аппаратуры, создании и внедрении новых конструктивных и функциональных материалов. Наряду с этим повышаются требования к их параметрам, которые изменяются под действием различных факторов космического пространства, таких как вакуум, солнечное ультрафиолетовое (УФ) излучение, потоки заряженных частиц (ионизирующее излучение), атомарный кислород, плазма, экстремальные температуры, термоциклирование, воздействие высокоскоростных мелкодисперсных частиц и многие другие.

Под влиянием вышеперечисленных и других факторов космического пространства в материалах и поверхностных элементах КА, в том числе солнечных батареях, происходят различные процессы, приводящие к ухудшению их эксплуатационных характеристик.

При изучении и прогнозировании изменений характеристик поверхностных элементов КА возникает множество затруднений, связанных с многообразием воздействующих факторов, возможностью их воздействия в различных сочетаниях и в разной временной последовательности, в связи с чем исследования в этой области остаются актуальными.

Результаты натурных испытаний до настоящего времени показывали относительно невысокое уменьшение тока солнечных батарей (табл. 1) [1], поэтому система регистрации изменения параметров при проведении имитационных испытаний должна иметь высокую точность и чувствительность.

Таким образом, исходя из необходимости решения существующей проблемы ухудшения эксплуатационных характеристик поверхностных элементов, в данной работе предлагается лабораторный стенд для исследования изменения характеристик солнечных батарей при воздействии высокоскоростных пылевых частиц с возможностью его модернизации для исследования дополнительных воздействующих факторов.

АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ, ЭКСПОНИРУЕМЫХ НА ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ

Солнечные батареи КА представляют собой набор фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), используемых для преобразования солнечной энергии в постоянный электрический ток. В основе ФЭП (рис. 1) лежит монокристаллическая кремниевая пластина с нанесенным слоем бора и фосфора для создания $p-n$ -перехода. При попадании света на освещаемую поверхность ФЭП, покрытую просветляющей пленкой, кванты света

Таблица 1. Оптическая деградация солнечных батарей на околоземных орбитах [1]

Орбита	Оптические потери, % /год, для полусфер космического аппарата						Среднее, %/год	Вклад ТЧ, %
	верхней	нижней	задней	передней	левой	правой		
НКО	0.0037	0.0002	0.0006	0.0139	0.0070	0.0069	0.0054	41.3
СКО	0.0018	0.0022	0.0009	0.0047	0.0022	0.0023	0.0024	7.6
ГСО	0.0016	0.0021	0.0011	0.0030	0.0022	0.0022	0.0020	0.6

Примечание. НКО – низкоорбитальный космический объект; СКО – среднеорбитальный космический объект; ГСО – геостационарный объект; ТЧ – твердые частицы.

поглощаются, создавая электронно-дырочные пары, которые разделяются полем $p-n$ -перехода, и между металлическими контактами возникает разность потенциалов. Защитное стекло (преимущественно кварцевое) используется для повышения срока эксплуатации ФЭП, задерживая часть падающего корпускулярного потока, а также минимизируя деструктивное воздействие от мелкодисперсных частиц.

Анализ известных типов ударных микродефектов на поверхности различных материалов в космическом диапазоне скоростей (8–16 км/с) позволяет перейти от физической модели кратера, полученной расчетным путем и подтвержденной с помощью туннельного микроскопа, к модели эквивалентной пустотелой сферы, погруженной в вещество на некоторую глубину [2, 3]. В случае высокоскоростных пылевых частиц, имеющих характерный размер 1–10 мкм, сквозного пробоя $p-n$ -перехода ФЭП не происходит [4], однако суммарная площадь поврежденной поверхности существенно превышает размеры воздействующей частицы за счет формирования при ударе поврежденной зоны диаметром D_1 , включающей в себя сколы и трещины, а также зоны оплавления

диаметром D_2 , как это показано на рис. 2 [5, 6]. На рис. 3 показана типовая фотография кратера на поверхности ФЭП. Диаметр поврежденной зоны на фотографии составляет 5 мкм.

Для оценки влияния факторов космической среды на солнечные батареи измеряют их основные электрические характеристики: $I_{кз}$ – ток короткого замыкания и $U_{хх}$ – напряжение холостого хода, связанные формулой [4]:

$$U_{хх} = R_H I_{кз}, \quad (1)$$

где R_H – сопротивление нагрузки, на котором рассеивается максимальная электрическая мощность при определенной освещенности рабочей поверхности солнечной батареи.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

На основе существующего линейного ускорителя микрометеороидов, фотография которого представлена на рис. 4 [1], было разработано устройство для исследования изменения характеристик ФЭП при многофакторном воздействии

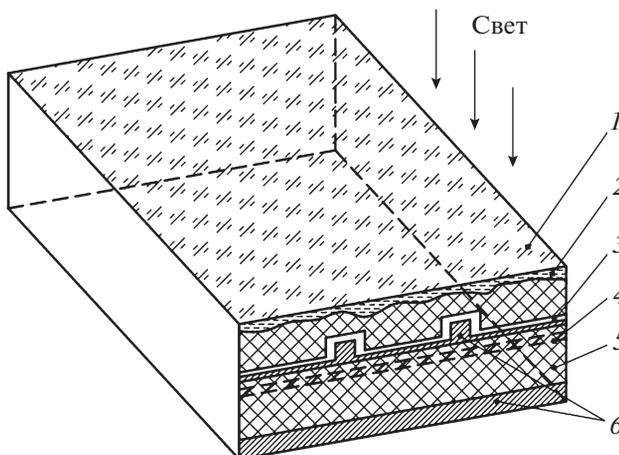


Рис. 1. Устройство ФЭП. 1 – защитное стекло; 2 – клей; 3 – просветляющее покрытие; 4 – $p-n$ -переход; 5 – кремниевая пластина; 6 – металлические контакты.

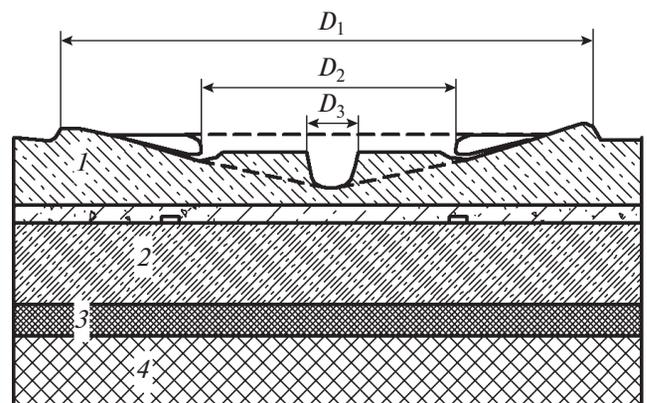


Рис. 2. Структура повреждения ФЭП. D_1 – диаметр поврежденной зоны, D_2 – диаметр зоны оплавления, D_3 – диаметр кратера; 1 – защитное стекло, 2 – кремниевая пластина, 3 – адгезионный слой, 4 – основание из стекловолокна.

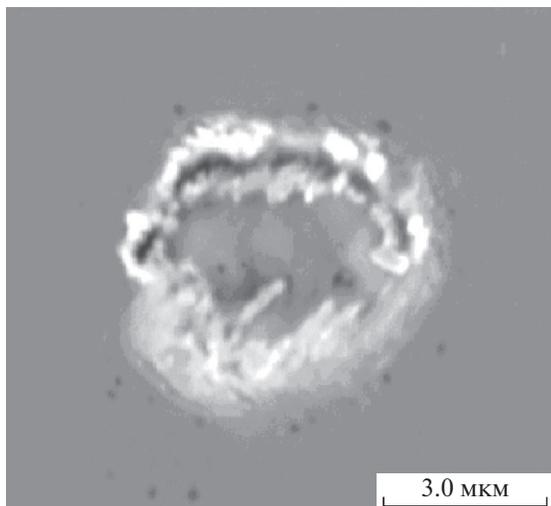


Рис. 3. Фотография кратера на поверхности солнечной батареи.

космического пространства. Структурная схема устройства приведена на рис. 5.

Основой лабораторного стенда является вакуумная камера с вводами для воздействующих факторов. В качестве источников воздействующих факторов на образцы служат линейный ускоритель микрометеороидов (ЛУ), электронно-лучевая пушка (ЭЛП) для формирования пучка электронов, а также источники формирования

ультрафиолета (УФ). Каждый из перечисленных источников имеет собственный блок управления, получающий команды от ЭВМ управления стендом. Внутри вакуумной камеры (рис. 6), в точке пересечения воздействующих факторов, располагается электронный измерительный модуль, содержащий пластину для крепления солнечных батарей, а также высокоточную схему измерения их характеристик. Электронный измерительный модуль регистрации параметров ФЭП (рис. 7), разработанный и изготовленный специально для описываемого эксперимента, имеет высокую чувствительность (выше 0.01%), что позволяет регистрировать минимальные изменения характеристик солнечных батарей [7].

Структурная схема модуля регистрации параметров ФЭП показана на рис. 8. Используется схема измерения с двумя солнечными батареями, при этом одна из них является измеряемой (и размещается в вакуумной камере ускорителя таким образом, чтобы находиться в зоне действия моделируемых факторов), а вторая – опорной (расположена в стороне от воздействий). При этом оба модуля ФЭП находятся при одинаковой температуре благодаря размещению на общей теплопроводящей пластине из алюминия, а также имеют одинаковый уровень облученности галогенными лампами (ГЛ) внутри камеры. Кроме этого, на теплопроводящей пластине установлен цифровой термометр (ДТ) с точностью измерения температуры до 0.1°C . Изменение периода

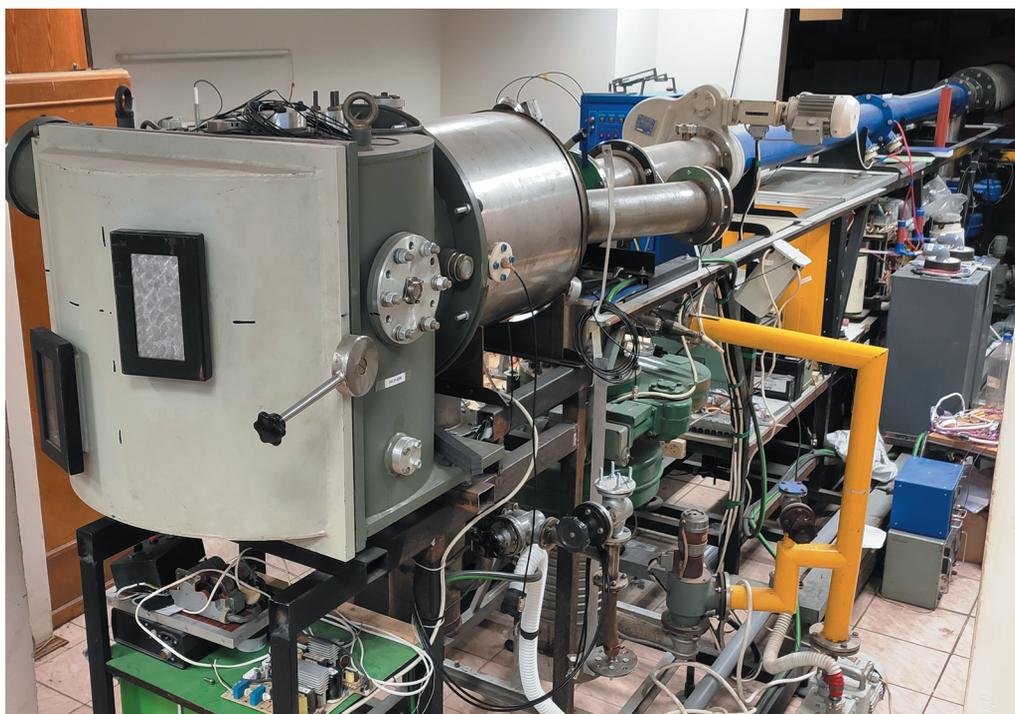


Рис. 4. Линейный ускоритель (Самарский университет).

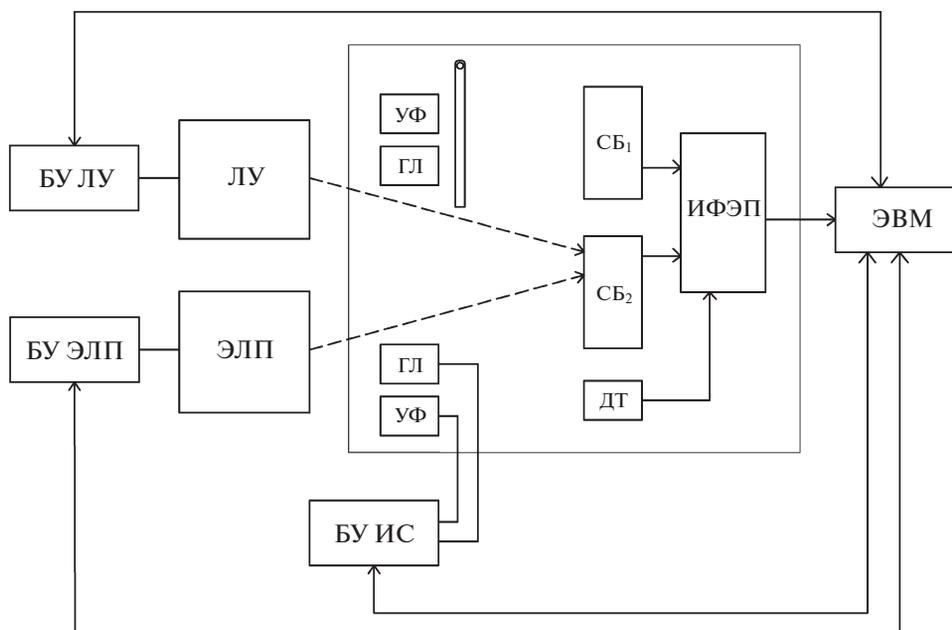


Рис. 5. Структурная схема лабораторного стенда для исследования солнечных батарей. Рамкой выделены элементы, размещаемые внутри вакуумной камеры ускорителя. ЛУ – линейный ускоритель; ЭЛП – электронно-лучевая пушка; УФ – источник ультрафиолетового излучения; ГЛ – галогенная лампа; СБ₁, СБ₂ – солнечные батареи; ДТ – датчик температуры; ЭВМ – компьютер; БУ ЛУ – блок управления линейным ускорителем; БУ ЭЛП – блок управления электронно-лучевой пушкой; БУ ИС – блок управления источниками света; ИФЭП – модуль для измерения характеристик ФЭП.

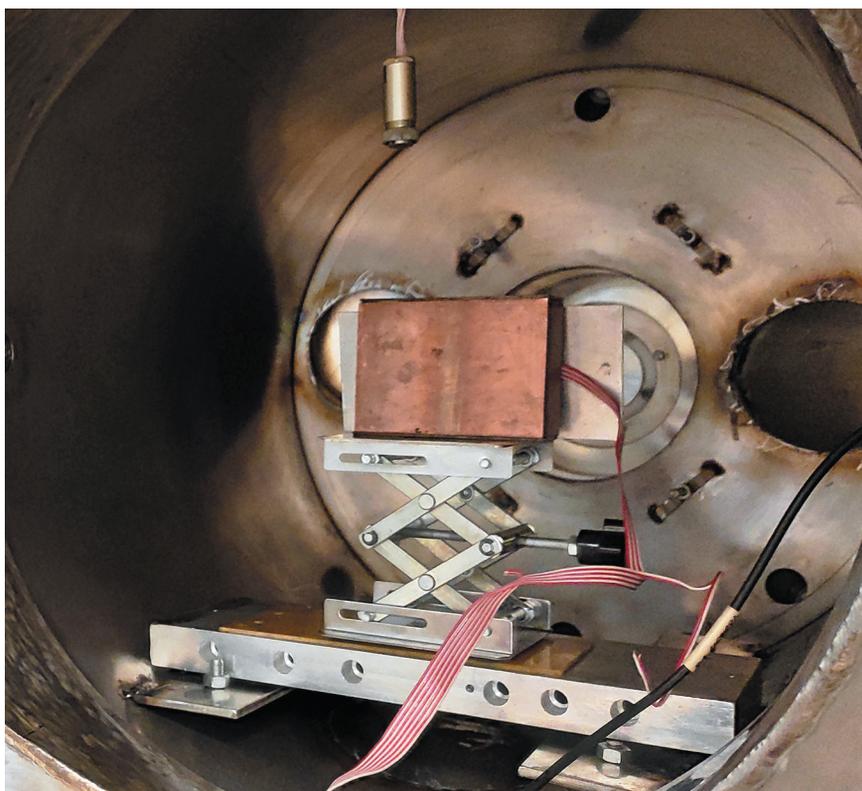


Рис. 6. Вакуумная камера с установленным устройством измерения характеристик солнечных батарей (источник света не установлен).

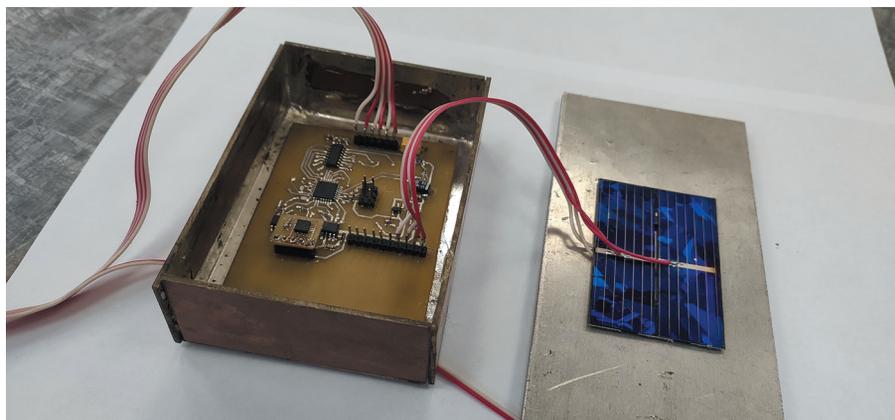


Рис. 7. Фотография измерительного модуля с подключенными солнечными батареями.

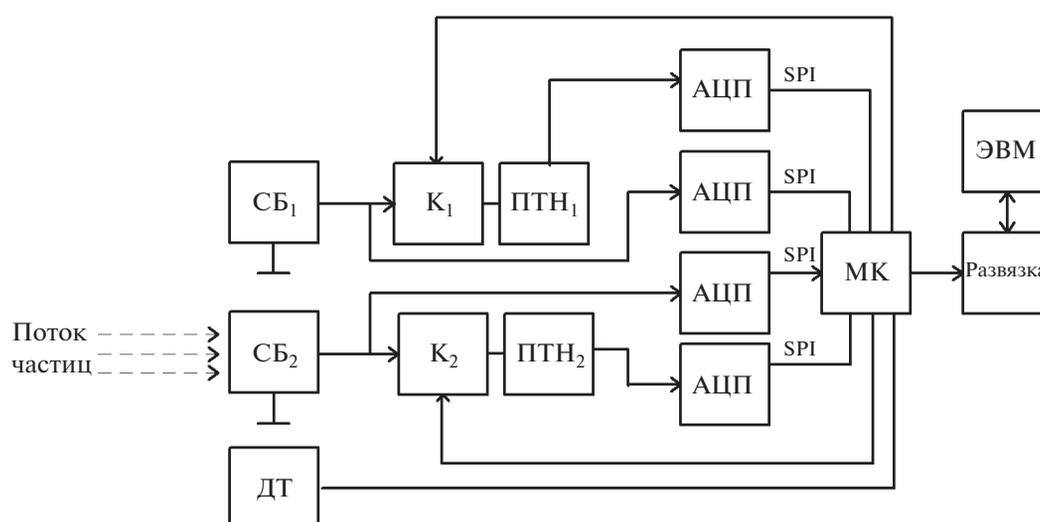


Рис. 8. Структурная схема блока для исследования повреждения солнечных батарей. $СБ_1$ и $СБ_2$ – опорная и контролируемая солнечные батареи; $К_1$ и $К_2$ – ключи для управления режимом “ток–напряжение”; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПНТ₁, ПНТ₂ – преобразователи ток–напряжение на операционных усилителях; МК – микроконтроллер; ДТ – датчик температуры.

включения галогенной лампы позволяет регулировать степень нагрева пластины с ФЭП и стабилизировать его температуру на определенном уровне. В качестве АЦП используется AD7190, имеющий разрядность 24 бит, 4 входа и частоту преобразования до 4.8 кГц. В качестве микроконтроллера используется Atmega328, связь с внешней ЭВМ осуществляется через интерфейс RS-485 с гальванической развязкой.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

При проведении эксперимента в вакуумной камере ускорителя были размещены две солнечные батареи площадью по 8 см² каждая. Первая батарея $СБ_1$ расположена в зоне воздействия ча-

стиц, вторая батарея $СБ_2$ смещена в сторону. На расстоянии 50 см от батарей установлена галогенная лампа мощностью 400 Вт, включающаяся во время измерения тока и напряжения. Результат измерений передается в ЭВМ по интерфейсу RS-485. В определенные интервалы времени галогенная лампа включается, при этом контролируется температура пластины с установленными солнечными батареями. Вследствие высокой облученности, а также низкого сброса тепла в окружающее пространство пластина начинает нагреваться, и в момент достижения заданной температуры (в данном эксперименте 50°C) осуществляется измерение тока и напряжения солнечных батарей. Следует отметить, что без обеспечения высокой точности измерения и стабилизации температуры солнечной батареи проведение данного экспери-

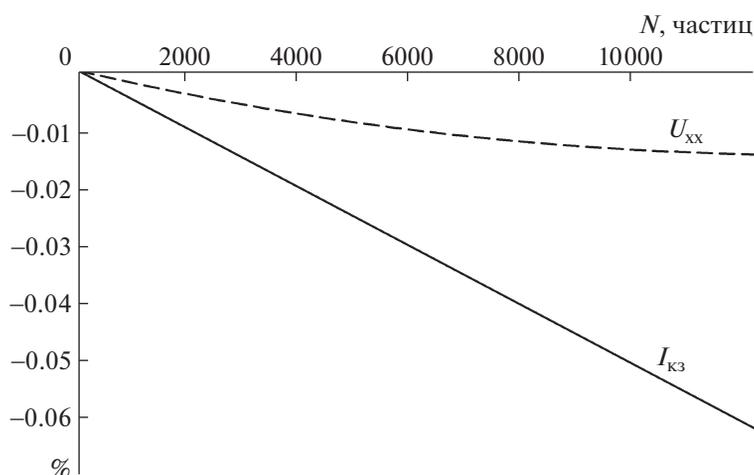


Рис. 9. Изменение характеристик солнечной батареи в зависимости от количества частиц.

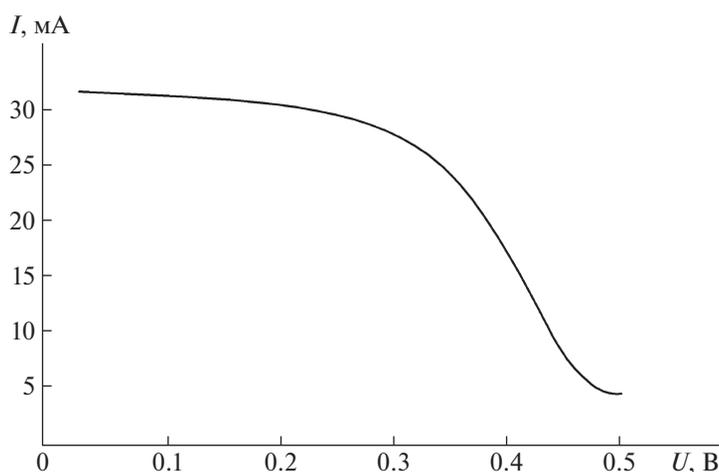


Рис. 10. Вольт-амперная характеристика солнечной батареи после эксперимента.

мента было бы невозможно: изменение мощности солнечной батареи достигает $1\%/^{\circ}\text{C}$. Использование псевдодифференциальной схемы существенно уменьшает эту погрешность (СБ₁ и СБ₂ нагреваются одновременно), однако часть температурной погрешности остается нескомпенсированной (ввиду неполной идентичности характеристик двух батарей). После проведения замеров (для повышения точности каждый параметр усредняется по 100 выборкам) галогенная лампа отключалась, чтобы исключить перегрев монтажной пластины сверх заданной величины. В результате принятых мер была достигнута повторяемость результатов измерений на уровне 0.005%, что позволило фиксировать минимальные изменения контролируемых характеристик.

Изменение тока короткого замыкания и напряжения холостого хода солнечной батареи после воздействия потока частиц в количестве

12000 штук размером 2–5 мкм и скоростями 1–8 км/с на площадь 8 см^2 представлены на рис. 9. Согласно рис. 9, ток короткого замыкания ($I_{КЗ}$) подвержен гораздо большему изменению, чем напряжение холостого хода (U_{XX}). На рис. 10 показана вольт-амперная характеристика солнечной батареи. Поскольку изменение характеристики солнечной батареи после проведения эксперимента составило порядка сотых долей процента, вольт-амперные характеристики солнечной батареи до и после эксперимента в приведенном масштабе фактически совпадают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований был разработан лабораторный стенд для исследования воздействия потоков высокоскоростных микрочастиц на энергетические

характеристики солнечных батарей. Предложены методики прогнозирования деградации параметров солнечных батарей при многофакторном воздействии с использованием лабораторных имитационных испытаний. Использование данного стенда и предложенной методики позволит ускорить испытания солнечных батарей и их защитных покрытий с целью обеспечения их функционирования в составе КА на околоземной орбите.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Semkin N.D., Kalaev M.P.* // Instruments and Experimental Techniques 2011. V. 54. № 1. P. 1260. <https://doi.org/10.1134/S0020441211010180>
2. *Semkin N.D., Kalaev M.P., Voronov K.E.* // Instruments and Experimental Techniques 2011. V. 54. № 3. P. 425. <https://doi.org/10.1134/S002044121103016X>
3. *Nadiradze A.B., Kalaev M.P., Semkin N.D.* // Cosmic Research. 2016. V. 54. № 5. P. 366. <https://doi.org/10.1134/S001095251605004X>
4. *Новиков Л.С., Надирадзе А.Б., Бедняков С.А., Гаврюшин А.В.* // Труды МАИ. Космическая техника и технологии. 2000. Вып. 1. С. 45.
5. *Herbert M.K., McDonnell J.A.M.* // Proc. of the 2nd Europ. Conf. on Space Debris. (ESA SP-393). Darmstadt, Germany, 17–19 March 1997. P. 1693.
6. *Семкин Н.Д., Калаев М.П., Новиков Л.С.* // Физика и химия обработки материалов. 2012. № 3. С. 30.
7. *Родина А.В., Калаев М.П.* // Всероссийская научно-техническая конференция “Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций”. 2021. С. 118.