

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ СВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМИТАТОРОВ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**А. А. Шевчук^{1,3} ✉, О. В. Пастушенко¹, В. В. Двирный^{1,2},
Г. В. Двирный³, А. А. Филатов⁴**

¹ АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

² Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Российская Федерация

³ Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Российская Федерация

⁴ ООО «НПО Гелиосфера»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Надежность как космических аппаратов в целом, так и отдельных их систем, подтверждается на этапе комплексной наземной экспериментальной отработки, включающей комплексные термовакуумные испытания. Тепловое состояние объекта испытаний в термовакуумных камерах получается, в частности, при помощи имитатора солнечного излучения. Для контроля энергетической освещенности имитатора солнечного излучения в условиях термовакуумных испытаний наиболее часто используют радиометры на основе кремниевых фотоэлектрических преобразователей. В то же время анализ особенностей кремниевых фотоэлектрических преобразователей показывает, что прямое измерение ими с требуемой для наземной отработки космических аппаратов точностью невозможно – их выходной сигнал нелинеен, зависит от принимаемого спектра, собственной температуры и обладает долговременной нестабильностью. Достижимая точность измерений прямо зависит от числа и точности применяемых средств и методов необходимой коррекции, из которых коррекция несоответствия спектра имитатора солнечного излучения спектру Солнца является самой сложной и трудоемкой. В то же время спектрально неселективные тепловые радиометры свободны от перечисленных недостатков. В ходе проведенного авторами эксперимента подтверждена значительная зависимость точности измерения энергетической освещенности радиометрами на основе кремниевых фотоэлектрических преобразователей от принимаемого спектра. Сделан вывод о наибольшей оправданности прямого измерения энергетической освещенности имитатора солнечного излучения в условиях термовакуумных испытаний тепловыми радиометрами.

Ключевые слова: термовакуумные испытания, имитатор солнечного излучения, энергетическая освещенность, спектральное несоответствие, фотоэлектрический преобразователь, тепловой радиометр.

Введение

Надежность как космических аппаратов (КА) в целом, так и отдельных их систем подтверждается на этапе проведения ключевых наземных испытаний – комплексной наземной экспериментальной отработки, включающей комплексные термовакуумные испытания (ТВИ). В ходе ТВИ

в термовакуумных камерах создаются условия пониженного давления и широкого диапазона температур, близкие к условиям эксплуатации КА.

Тепловое состояние объекта испытаний (ОИ) получается, в частности, путем имитации падающего излучения при помощи одного из базовых и наиболее сложных элементов испытательного оборудования – имитатора солнечного излучения (ИСИ), создающего в рабочей зоне термовакуумной камеры поле лучистого потока, формирующего спектр и интенсивность солнечного излучения. Согласно уста-

✉ shevchukaa@iss-reshetnev.ru

новленным в [1] требованиям, отчет о ТВИ вместе с полным изложением результатов содержит данные о работе имитаторов тепловых потоков, поле плотностей теплового потока от ИСИ, оценку погрешности измерения внешних тепловых потоков, с учетом которых делается вывод о реальных результатах испытаний, а с учетом их сравнения с результатами расчетов – о корректности тепловой аналитической модели и необходимости ее доработки.

В соответствии с предъявляемыми требованиями существующие в настоящее время крупногабаритные отечественные ИСИ для наземной отработки КА обеспечивают следующие основные характеристики:

- уровень энергетической освещенности: 1340–1440 Вт/м²;
- неоднородность энергетической освещенности: до 15 %;
- спектральный диапазон, близкий к диапазону солнечного излучения в области 200–2000 нм;
- непараллельность: до 4° [2].

Краткие характеристики трех действующих отечественных крупногабаритных ИСИ для ТВИ КА приведены в табл. 1 [3].

Контроль с необходимой точностью основных характеристик ИСИ, в первую очередь уровня и неоднородности энергетической освещенности (ЭО), требует необходимого метрологического обеспечения. При этом следует отметить, что на сегодняшний день характеристики ИСИ для наземной отработки КА не регламентируются государственными стандартами. Наиболее близок действующий ГОСТ 60904, идентичный международному стандарту МЭК 60904, который классифицирует характеристики ИСИ наземных условий АМ1,5 (англ. Air Mass 1,5) для испытания фотоэлектрических устройств, главным образом – солнечных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), а также методы измерения ЭО ИСИ при помощи кремниевых ФЭП [4–9]. Общие требования к методам измерения световых характеристик электрических световых источников установлены ГОСТ Р 55702-2013, согласно которым предел допускаемой относительной погрешности измерения характеристик светового потока должен быть не более ±5% при доверительной вероятности 0,95, а электроизмерительные приборы, применяемые в электронных

системах измерения, должны иметь класс точности не ниже 1,0 с отклонением от линейности не более ±1 %. Обязательным требованием является также поверка средств измерений (СИ) [10], включенных в государственный реестр средств измерений (ГРСИ). Методика поверки установлена ГОСТ Р 8.587-2001 и относится ко всем видам радиометров – фотодиодам, фотоэлементам и тепловым приемникам излучения, предназначенным для измерения световых характеристик ИСИ, в том числе ИСИ заатмосферного спектра АМ0 (англ. Air Mass 0) на основе газоразрядных ксеноновых ламп [11].

Как правило, для измерения ЭО ИСИ используют радиометры на основе кремниевых ФЭП [12]. Для сканирования световых полей больших размеров применяют сканирующие устройства, например, двухкоординатного типа, где рейка с большим количеством измерительных ФЭП в одной оси перемещается в пределах другой оси.

Общую систематическую погрешность радиометров для измерения ЭО ИСИ определяют в соответствии с [11]. Относительное среднее квадратическое отклонение S_0 результатов n независимых измерений рассчитывают по формуле:

$$S_0 = \frac{\left[\sum_{j=1}^n (\bar{I} - I_j)^2 \right]^{1/2}}{\bar{I} [n(n-1)]^{1/2}}, \quad (1)$$

где I_j – результат j -го независимого измерения; \bar{I} – среднее арифметическое результатов n независимых измерений.

Границу относительной неисключенной систематической погрешности (НСП) Θ_j определяют по формуле:

$$\Theta_0 = 1,1 \left(\sum_{j=1}^4 \Theta_j^2 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где Θ_j – граница j -й неисключенной систематической погрешности.

Для радиометров принимают $\Theta_0 > 8S_0$. Тогда случайной погрешностью по сравнению с систематической пренебрегают и принимают предел допускаемой основной относительной погрешности $\Delta_0 = \Theta_0$ [11].

Таблица 1

Основные характеристики отечественных крупногабаритных ИСИ

	Источник излучения	Размеры освещаемой поверхности, м	Неоднородность энергетической освещенности, %, не более	Максимальная энергетическая освещенность, Вт/м ²
ИСИ ТБК-120	Газоразрядные ксеноновые лампы	2×2	10	1600
ИСИ ГВУ-600		4×4		1600
ИС-500		3×8		1500

Составляющие относительной НСП $\Theta_1 \dots \Theta_N$ могут включать:

- погрешность измерений абсолютной чувствительности;
- погрешность коррекции спектрального несоответствия;
- погрешность коррекции нелинейности;
- погрешность коррекции температурной зависимости;
- погрешности, вызванные другими причинами.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на точность измерения характеристик ИСИ в условиях ТВИ кремниевыми ФЭП.

1. Спектральное несоответствие

Возникновение систематической погрешности измерения вызвано взаимным несоответствием солнечного спектра АМ0 (рис. 1, кривая 1), излучения ИСИ (рис. 1, кривые 2 и 3) и спектральной чувствительности (отклика) ФЭП (рис. 1, кривая 4). Если измерительные ФЭП калибруются по эталонному и они не идентичны по конструкции, не выполнены из одного материала, то необходимо также учитывать несоответствие их спектральных характеристик [5].

Самое высокое соответствие стандартному солнечному спектру демонстрируют ИСИ с комбинированным применением галогенных ламп в инфракрасной и красной области и газоразрядных ксеноновых ламп с коррекцией их излучения светофильтрами для подавления эмиссионных

линий [13]. Однако в связи со сложностью реализации такого способа в большинстве крупногабаритных отечественных ИСИ, таких как ИСИ ТБК-120 и ГВУ-600 (табл. 1), используются газоразрядные ксеноновые лампы без светофильтров (рис. 1, кривая 3).

Выходной сигнал ФЭП находится в прямой зависимости от его спектральной чувствительности и спектрального распределения поступающего светового потока во всем рабочем диапазоне длин волн λ :

$$J_{кз} = \int SR(\lambda)E(\lambda)d\lambda, \tag{3}$$

где $J_{кз}$ – плотность тока короткого замыкания ФЭП; $SR(\lambda)$ – спектральный отклик ФЭП; $E(\lambda)$ – спектральная освещенность светового потока.

Общее несоответствие стандартного солнечного спектра и спектра ИСИ, а также спектральных чувствительностей эталонного и измерительного ФЭП может быть выражено в виде коэффициента спектрального несоответствия MM :

$$MM = \frac{J_{кз(ЭТ, E_{AM0})} J_{кз(ИЗМ, E_{ИСИ})}}{J_{кз(ЭТ, E_{ИСИ})} J_{кз(ИЗМ, E_{AM0})}} = \frac{\int SR_{ЭТ}(\lambda)E_{AM0}(\lambda)d\lambda \int SR_{ИЗМ}(\lambda)E_{ИСИ}(\lambda)d\lambda}{\int SR_{ЭТ}(\lambda)E_{ИСИ}(\lambda)d\lambda \int SR_{ИЗМ}(\lambda)E_{AM0}(\lambda)d\lambda}, \tag{4}$$

где индекс «ЭТ» обозначает эталонный ФЭП; индекс «ИЗМ» – измерительный ФЭП; индекс «АМ0» – спектральную освещенность АМ0; индекс «ИСИ» – спектральную освещенность ИСИ.

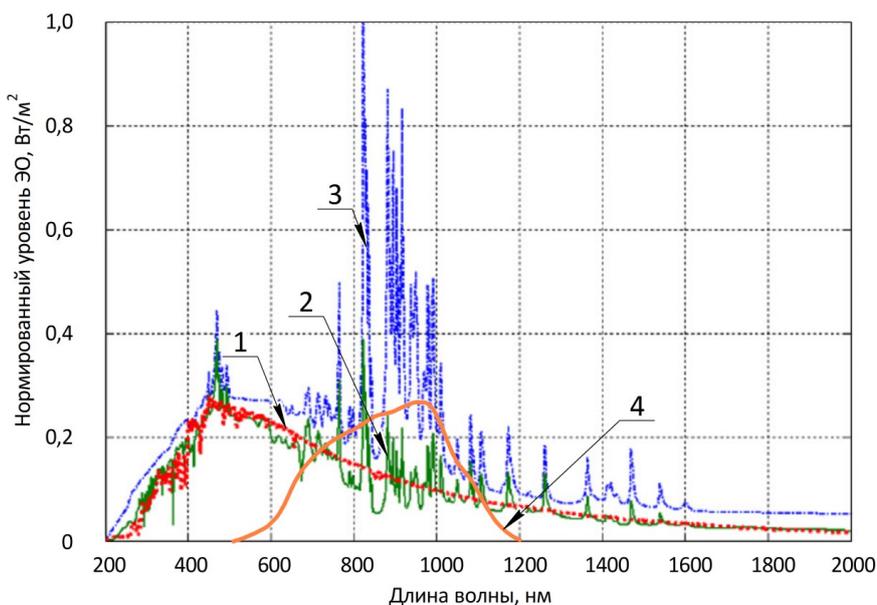


Рис. 1. Сравнительные спектральные характеристики:

- 1 – солнечный спектр АМ0; 2 – излучение ИСИ на основе газоразрядных ксеноновых ламп ХВО с корректирующими светофильтрами; 3 – излучение ИСИ на основе газоразрядных ксеноновых ламп ХВО без корректирующих светофильтров; 4 – спектральная чувствительность типичного кремниевого ФЭП в режиме измерения тока короткого замыкания

С учетом коэффициента спектрального несоответствия MM по выходному сигналу ФЭП можно определить эффективную ЭО стандартного спектра G_{AM0} , которая соответствует измеренной ЭО с фактическим спектром излучения ИСИ $G_{ИЗМ}$:

$$G_{AM0} = MM \cdot G_{ИЗМ}, \quad (5)$$

где $G_{ИЗМ}$ – значение ЭО, полученное измерительным ФЭП со спектральной чувствительностью $SR_{ИЗМ}(\lambda)$.

2. Нелинейность

Многие программы и методики ТВИ предусматривают изменение ЭО светового потока ИСИ с учетом сезонного изменения солнечной постоянной или затенения, например, для имитации поворота ОИ относительно Солнца. Это требует изменения ЭО ИСИ в широком диапазоне значений, начиная от 400 Вт/м², измерение которого должно быть обеспечено высокой линейностью как измерительных, так и эталонных ФЭП.

В соответствии с общепринятой практикой [5] ФЭП калибруются при стандартном значении солнечной постоянной, а для измерения других значений ЭО принимается предположение о линейной зависимости тока короткого замыкания $I_{КЗ}$ ФЭП от уровня ЭО. С другой стороны, напряжение холостого хода $U_{ХХ}$ ФЭП находится в нелинейной логарифмической зависимости от ЭО, достигая типичной величины насыщения 0,45–0,55 В для кремниевых ФЭП (рис. 2). Следовательно, зависимость тока нагрузки от ЭО при сопротивлении нагрузки, отличном от нулевого, также нелинейна.

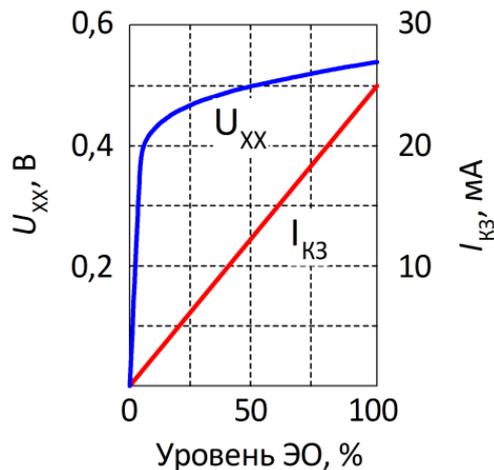


Рис. 2. Зависимость напряжения холостого хода U_{XX} и тока короткого замыкания $I_{КЗ}$ от уровня ЭО типичного кремниевого ФЭП

Поскольку выходным сигналом измерительных ФЭП является величина падения напряжения на нагрузочном (шунтирующем) резисторе, сопротивление последнего выбирается как можно мень-

шим. В частности, для прецизионных резисторов эталонных ФЭП должно выполняться условие [5]:

$$I_{КЗ} \cdot R_{Ш} < 0,003 \cdot U_{XX}, \quad (6)$$

где $R_{Ш}$ – величина шунтирующего резистора; $I_{КЗ}$ – ток короткого замыкания эталонного прибора при нормальных условиях (НУ); U_{XX} – напряжение холостого хода при НУ.

С другой стороны, уровень выходного сигнала ФЭП прямо пропорционален величине нагрузочного резистора, которая по этой причине не может быть бесконечно малой и представляет компромисс между чувствительностью применяемых средств измерения и приемлемой линейностью. Например, экспериментальное измерение линейности типичного измерительного ФЭП предлагаемым в работе [14] методом показало на одиннадцати уровнях ЭО от 100 до 1100 Вт/м² систематическую погрешность измерения до 2 %.

Другой особенностью многих ФЭП является зависимость спектральной чувствительности от различных уровней ЭО, что также приводит к общей нелинейности показаний. В худшем случае для многопереходных прямозонных структур систематическая погрешность может превышать 15 % [9].

Одним из способов решения проблемы является метод измерения дифференциальной спектральной чувствительности, разработанный в РТВ (Германия) [15], при котором ФЭП одновременно освещают монохроматическим излучением малой интенсивности и галогенными лампами накаливания, при помощи которых обеспечивают соответствующий различным уровням солнечной облученности уровень смещения. Независимые одновременные измерения сигналов достигаются модуляцией монохроматического излучения, а уровень смещения регистрируется на постоянном токе. Далее проводят коррекцию нелинейности ФЭП с учетом измеренной спектральной чувствительности на нескольких, например, восьми уровнях ЭО [16].

3. Температурная зависимость

Процедуры поверки и калибровки ФЭП проводятся в НУ при собственной температуре ФЭП 25 ± 2 °С [5; 11]. Однако как эффективность, так и спектральная чувствительность измерительного ФЭП в значительной степени зависят от его температуры [17; 18], которая отличается от НУ (рис. 3) и определяется температурными условиями ТВИ и нагревом световым потоком ИСИ высокой интенсивности.

Так, систематическая погрешность в показаниях ФЭП, вызванная изменением температуры в диапазоне от -50 до $+50$ °С, может достигать 12 %. [12]. Одним из способов обеспечения

необходимой точности измерений является стабилизация температурного режима ФЭП. Однако условия широкого диапазона температур и вакуума, в которых проводятся ТВИ, делают невозможным естественное конвекционное охлаждение и требуют принудительного термостатирования ФЭП контактным способом. Другим эффективным способом в условиях ТВИ является коррекция показаний ФЭП с учетом его температуры [12; 19]. Высокую точность коррекции при этом могут обеспечить температурные датчики, встроенные непосредственно в структуру ФЭП. Необходимо также контролировать температуру шунтирующего резистора. Так, изменение температуры никромового резистора на 100 °С приводит к изменению его сопротивления на 2 % и, как следствие, такому же изменению выходного сигнала ФЭП. Для медных или латунных шунтирующих резисторов это значение намного больше.

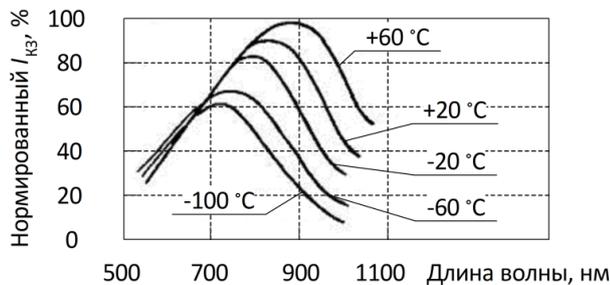


Рис. 3. Зависимость эффективности и спектральной чувствительности ФЭП от температурных условий ТВИ

В [4; 9] также отмечается, что изменение температуры ФЭП при применении в ИСИ эмиссионных ламп типа ксеноновых может привести к изменению ширины запрещенной зоны структуры ФЭП из однопереходных и многопереходных прямозонных структур и пропусканию элементами структуры некоторых эмиссионных линий ламп. В свою очередь, это приводит к значительным сдвигам в рабочих характеристиках ФЭП и дополнительной систематической погрешности измерений.

4. Долговременная нестабильность

Условия проведения ТВИ, такие, как высокая интенсивность излучения и широкий диапазон температур, приводят к ускоренной деградации измерительных ФЭП [12]. Это требует проведения не только первичной, но и вторичных периодических калибровок, которые проводят в НУ при условиях стандартной солнечной освещенности с использованием эталонного прибора — ФЭП или пиранометра, имеющего стабильные фотоэлектрические характеристики и линейную зависи-

мость выходного сигнала от ЭО во всем требуемом диапазоне [4; 5].

В настоящее время в ГРСИ включен единственный эталонный кремниевый фотопреобразователь лучистого потока КФЛП-3, имеющий относительную погрешность измерений ЭО спектра АМ0 в НУ на уровне ЭО 1367 Вт/м², не превышающую 4,3 %. КФЛП-3 включены ФКП «НИЦ ракетно-космической промышленности» в ГРСИ в количестве 20 шт., что ограничивает их использование в качестве эталонного прибора. Не могут использоваться и включенные в ГРСИ пиранометры Пеленг СФ-06, СМР6 и СМР21, имеющие погрешность измерения в НУ до 11 %.

В то же время действующие государственные стандарты допускают измерение ЭО ИСИ радиометрами теплового потока того же диапазона длин волн [6; 10; 11]. Это хорошо согласуется с тем, что при ТВИ имитируется главным образом тепловое воздействие солнечного излучения, соответствующее условиям открытого космоса АМ0 с учетом затенения и сезонного изменения солнечной постоянной, а из-за размерных ограничений испытательной базы допускается отсутствие на ОИ солнечных батарей [1]. Тепловые радиометры являются спектрально неселективными приемниками теплового потока, требуют минимальной коррекции и из-за меньшего числа составляющих систематической погрешности способны обеспечить более высокую точность измерения ЭО.

5. Экспериментальная часть

Для подтверждения сделанных выводов авторами был проведен простой, но наглядный эксперимент, в ходе которого определена зависимость точности измерения ЭО радиометрами различных видов от спектра светового источника.

В качестве двух световых источников различных спектров использованы короткодуговая газоразрядная ксеноновая лампа OSRAM XBO W/HS XL OFR (ксеноновая лампа) и мощная галогенная лампа накаливания (лампа накаливания), снабженные отражающими оптическими элементами.

Измерения проведены двумя радиометрами на основе кремниевых ФЭП и одним тепловым радиометром:

- радиометр КФЛП-1 (КФЛП-1) представляет собой кремниевый ФЭП из восьми секций, закрепленных на теплоотводящей металлической пластине и нагруженных на прецизионный резистор величиной 0,02 Ом;

- радиометр ДОК-1С (ДОК-1С) представляет собой кремниевый ФЭП из одного сегмента, закрепленного на стеклотекстолитовой пластине и нагруженного на резистор общего применения С5-16МВ величиной 0,3 Ом;

• теплоприемник суммарного теплового потока ФОА 020 (ФОА 020) содержит медный тепловоспринимающий элемент, связанный с чувствительным элементом в форме тепловоспринимающего диска из структуры кремний на сапфире с термоэлектрической микросхемой. При поступлении теплового потока вдоль радиуса тепловоспринимающего элемента возникает градиент температуры, который преобразуется термоэлектрической микросхемой в термоэлектродвижущую силу. Чувствительность датчика зависит от температуры корпуса, для контроля которой в тепловоспринимающий диск встроен пленочный кремниевый терморезистор [20].

ФОА 020 рассчитан на работу как в НУ, так и в вакууме до $130 \cdot 10^{-6}$ Па при температуре корпуса от -100 до $+120$ °С и обеспечивает следующие характеристики:

- диапазон измерения ЭО: от 0 до $3,5$ кВт/м²;
- предел допускаемой границы основной относительной погрешности измерения теплового потока: не более 5 % при доверительной вероятности 0,95;
- спектральный диапазон измеряемого теплового потока: от 200 до 10000 нм.

Более подробно возможность применения ФОА 020 в условиях ТВИ рассмотрена в работе [21].

Использованный в эксперименте ФОА 020 откалиброван в НУ методом прямых измерений с помощью Государственного вторичного эталона единиц силы излучения и энергетической освещенности непрерывного оптического излучения в диапазоне длин волн от 200 до 2500 нм 2.1.ZZA.0010.2015, прослеживаемого к Государственному первичному эталону единиц радиометрических и спектрорадиометрических величин в диапазоне длин волн от 200 до 2500 нм ГЭТ 86-2017.

Схема проведения эксперимента приведена на рис. 4. Световые источники, ксеноновая лампа 1 или лампа накаливания 2 поочередно создают на вертикально установленном щите 3 равномерно освещаемую область. За отверстием в центре щита, совпадающим с центром освещаемой области, установлена подвижная пластина 4, на которой на одной линии находятся радиометры ФОА 020 (5), КФЛП-1 (6) и ДОК-1С (7). В отверстие также выведены световоды системы измерения спектра 8, которая состоит из двух измерительных частей для инфракрасной и видимой области спектра на основе монохроматоров МДР-206 (9) и персонального компьютера 10 со специализированным программным обеспечением. Мультиметром Agilent 34401A (11) измеряется выходное напряжение радиометров с погрешностью 0,0035 %, сопротивление встроенного терморезистора ФОА 020 – с погрешностью 0,01 %.

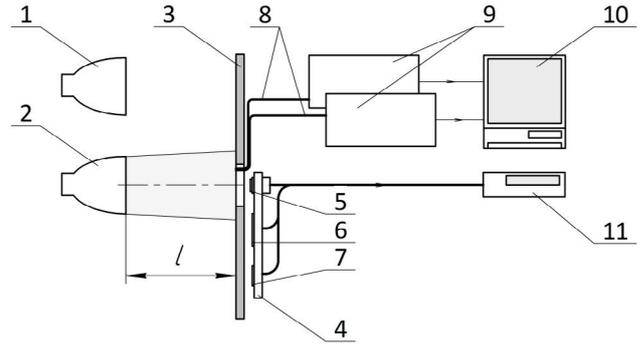


Рис. 4. Схема проведения эксперимента

Для каждого светового источника после предварительного прогрева в освещаемой области щита последовательно с равным шагом установлены десять уровней ЭО от 10 до 100 % путем изменения расстояния l от поверхности щита до светового источника. Уровни ЭО контролировались по интегральному значению освещенности $q_{ин}$, рассчитанному по формуле:

$$q_{ин} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

где λ_1 и λ_2 – верхняя и нижняя границы определения спектра, равные 200 и 2500 нм; $E(\lambda)$ – соответствующая спектральному распределению освещенность, определенная системой измерения спектра.

На каждом установленном таким образом уровне ЭО в центр освещаемой области линейным перемещением пластины 4 поочередно выводились радиометры 5, 6 и 7 и измерялся их выходной сигнал, которым для КФЛП-1 и ДОК-1С является величина падения напряжения на шунтирующем резисторе $U_{вых}$, для ФОА 020 – плотность измеренного теплового потока и соответствующий ей уровень ЭО q , определенный в соответствии с формулой [20]:

$$q = \frac{1}{K_{20}} \left[\frac{E}{1 + \alpha(R - R_{20})} \right] \cdot 10^3, \quad (8)$$

где q – уровень измеренной ЭО, Вт/м²; E – выходное напряжение тепловоспринимающего элемента, мВ; R – сопротивление терморезистора при измерении E , Ом; K_{20} – чувствительность теплоприемника при 20 °С, по результатам калибровки равная $6,03$ мВ·м²/кВт; R_{20} – паспортное сопротивление терморезистора при 20 °С, равное 328 Ом; α – паспортный температурный коэффициент чувствительности, равный $0,009$ Ом⁻¹.

Результаты измерений сведены в табл. 2 и представлены в графическом виде на рис. 5 и 7. Результаты эксперимента показали, что выходной сигнал теплового радиометра пропорционален интегральному значению ЭО и не зависит от спектра

светового источника. Выходной сигнал радиометров на основе кремниевых ФЭП, наоборот, в значительной степени зависит от принимаемого спектра. Так, на равных уровнях ЭО 145...147 Вт/м² (табл. 2,

выделенная строка) выходной сигнал КФЛП-1 при измерении ЭО ксеноновой лампы больше в 2,3 раза, ДОК-1С – в 1,8 раза. На других уровнях ЭО это отношение еще больше.

Таблица 2

Сравнительные результаты измерений световых источников

$q_n, \%$	Газоразрядная ксеноновая лампа					Галогенная лампа накаливания				
	ФОА 020			КФЛП-1	ДОК-1С	ФОА 020			КФЛП-1	ДОК-1С
	$E, \text{ мВ}$	$R, \text{ Ом}$	$q, \text{ Вт/м}^2$	$U, \text{ мВ}$	$U, \text{ мВ}$	$E, \text{ мВ}$	$R, \text{ Ом}$	$q, \text{ Вт/м}^2$	$U, \text{ мВ}$	$U, \text{ мВ}$
10	0,895	330,8	145	4,269	16,098	0,905	330,5	147	1,87	8,964
20	1,806	329,9	294	14,619	36,12	1,804	330,6	292	3,099	15,073
30	2,712	330,4	440	22,456	45,357	2,703	330,8	437	4,545	21,826
40	3,605	331,4	580	27,864	54,353	3,603	331,3	580	5,851	26,93
50	4,51	333	716	34,854	71,364	4,503	331,7	723	7,276	33,272
60	5,403	334,8	844	40,623	90,156	5,402	332,1	864	8,608	39,012
70	6,305	337,6	962	46,705	111,77	6,303	332,7	1003	10,09	45,303
80	7,229	339	1091	53,83	140,89	7,206	333,8	1136	11,441	50,974
90	8,104	340,2	1211	60,603	172,37	8,103	334,9	1265	12,897	57,397
100	9,024	341	1340	63,691	195,83	9,006	336,6	1386	14,304	63,35

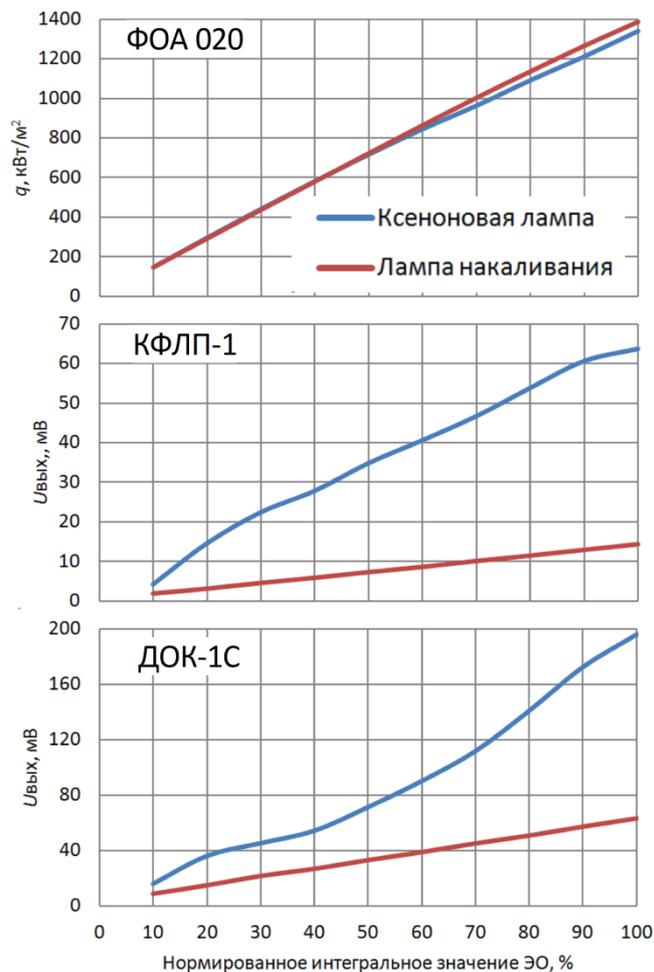


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала различных радиометров от спектра

Спектры световых источников при равных интегральных значениях ЭО 145...147 Вт/м² в области 200 ... 2500 нм показаны на рис. 6. Можно заметить, что полученное двукратное соотношение интегральных значений ЭО световых источни-

ков соответствует области 500–1200 нм (заштрихованные участки), что говорит об узкой области спектральной чувствительности рассмотренных в эксперименте кремниевых фотоэлектрических преобразователей.

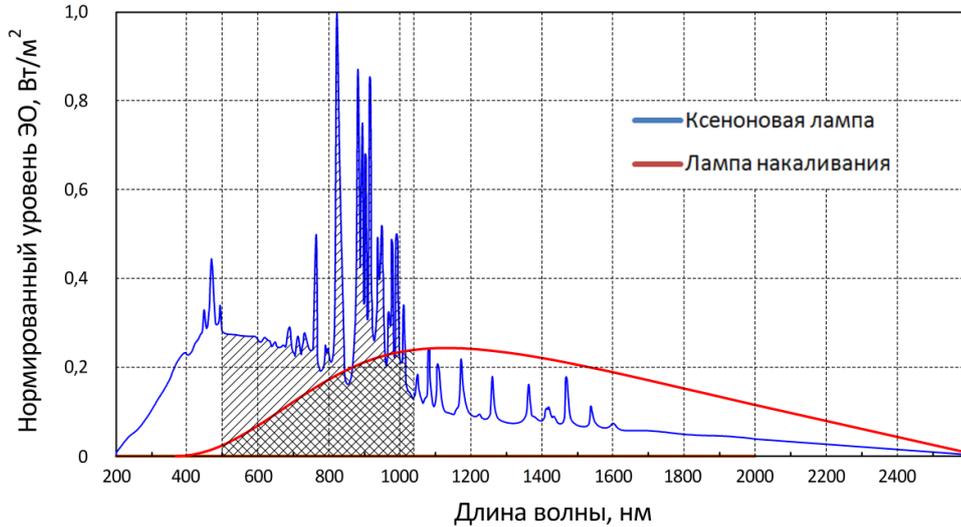


Рис. 6. Спектры световых источников равных интегральных значений ЭО в области 200 ... 2500 нм. Штриховкой выделена область совместного излучения 500 ... 1200 нм

На рис. 7 хорошо заметна нелинейность радиометров на основе кремниевых ФЭП при измерении ЭО ксеноновой лампы, что говорит о значительной зависимости их линейности от спектра светового источника, намного большей, чем от величины шунтирующего резистора, которая незначительна при измерении ЭО лампы накаливания. Это может быть вызвано присутствием большого числа эмиссионных линий ксеноновой лампы в области спектральной чувствительности кремниевых ФЭП и связанными с этим их особенностями [4; 9].

Заключение

Несмотря на широкое применение радиометров на основе кремниевых фотоэлектрических преобразователей, прямое измерение ими энергетической освещенности имитатора солнечного излучения с требуемой для наземной обработки космических аппаратов точностью невозможно. Анализ особенностей кремниевых фотоэлектрических преобразователей показывает, что их выходной сигнал нелинеен и в значительной степени зависит от спектра светового источника, собственной температуры и обладает долговременной нестабильностью. Достижимая при этом точность измерений прямо зависит от числа и точности применяемых средств и методов необходимой коррекции, из которых коррекция спектрального несоответствия является самой сложной и трудоемкой, поскольку расчет коэффициента спектрального несоответствия требует измерения с высокой точностью фактического спектра имитатора солнечного излучения.

Результаты проведенного авторами эксперимента подтвердили, что точность измерения энергетической освещенности радиометрами на основе кремниевых фотоэлектрических преобразователей в значительной степени зависит от спектра имитатора солнечного излучения, а максимум их спектральной чувствительности находится в узкой области наибольшей спектральной неравномерности применяемых в большинстве случаев газоразрядных ксеноновых ламп. В свою очередь, тепловые радиометры свободны от указанных недостатков.

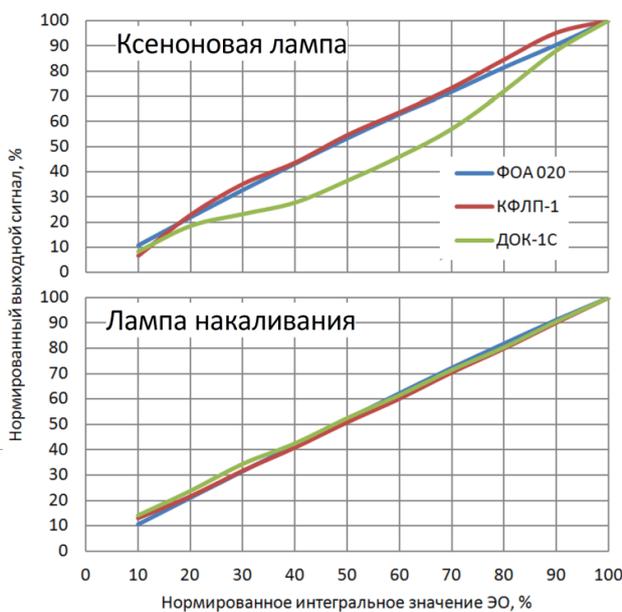


Рис. 7. Зависимость линейности радиометров от спектра

Принимая во внимание полученные результаты и особенности термовакуумных испытаний космических аппаратов, где имитатор солнечного излучения применяется главным образом для имитации теплового воздействия солнечного излучения, следует признать наиболее оправданным прямое измерение энергетической освещенности в условиях термовакуумных испытаний спектрально неселективными тепловыми радиометрами.

Список литературы

- [1] ГОСТ Р 56469-2015. Аппараты космические автоматические. Термобалансные и термовакуумные испытания. М. : Стандартинформ, 2015. 11 с.
- [2] Кравченко С. В., Нестеров С. Б., Романько В. А., Тестоедов Н. А., Халиманович В. И., Христинич В. В. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1 (13). С. 149–175.
- [3] Асланян Р. О., Анисимов Д. И., Марченко И. А., Пантелеев В. И. Имитаторы солнечного излучения для термовакуумных испытаний космического аппарата // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. № 2. С. 323–327.
- [4] ГОСТ Р МЭК 60904-1-2013. Приборы фотоэлектрические. Ч. 1. Измерения вольтамперных характеристик. М. : Стандартинформ, 2014. 12 с.
- [5] ГОСТ Р МЭК 60904-2-2013. Приборы фотоэлектрические. Ч. 2. Требования к эталонным солнечным приборам. М. : Стандартинформ, 2014. 10 с.
- [6] ГОСТ Р МЭК 60904-7-2013. Приборы фотоэлектрические. Ч. 7. Вычисление поправки на спектральное несоответствие при испытаниях фотоэлектрических приборов. М. : Стандартинформ, 2014. 8 с.
- [7] ГОСТ Р МЭК 60904-8-2013. Приборы фотоэлектрические. Ч. 8. Измерение спектральной чувствительности фотоэлектрических приборов. М. : Стандартинформ, 2014. 8 с.
- [8] ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016. Приборы фотоэлектрические. Ч. 9. Требования к характеристикам имитаторов солнечного излучения. М. : Стандартинформ, 2017. 12 с.
- [9] ГОСТ Р МЭК 60904-10-2013. Приборы фотоэлектрические. Ч. 10. Методы определения линейности характеристик. М. : Стандартинформ, 2014. 13 с.
- [10] ГОСТ Р 55702-2013. Источники света электрические. Методы измерения электрических и световых параметров. М. : Стандартинформ, 2014. 44 с.
- [11] ГОСТ Р 8.587-2001. Средства измерений характеристик оптического излучения солнечных имитаторов. Методика поверки. М. : Госстандарт России, 2002. 16 с.
- [12] Крат С. А. Собственная температурная зависимость кремниевых фотопреобразователей лучистого потока при тепловакуумных испытаниях космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск. 2015. Т. 1. С. 375–376.
- [13] Schubert F., Spinner D. Solar simulator spectrum and measurement uncertainties // Energy Procedia, 2016, no. 92, pp. 205–210.
- [14] Müllejjans H., Salis E. Linearity of photovoltaic devices: quantitative assessment with N-lamp method // Measurement Science and Technology, 2019, no. 30, 065008 (9 pp). doi: 10.1088/1361-6501/ab1231
- [15] Metzendorf J., Winter S., Wittchen T. Radiometry in photovoltaics: calibration of reference solar cells and evaluation of reference values // Metrologia, 2000, no. 37, pp. 573–578.
- [16] Фиданян Г. С., Морозова С. П., Парфентьев Н. А., Катышева А. А., Лисянский Б. Е., Саприцкий В. И. Установка для измерения абсолютной спектральной чувствительности солнечных элементов в стандартных условиях // Сборник «Труды XXIV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения», 2016, С. 258–262.
- [17] Osterwald C. R., Campanelli M., Moriarty T., Emery K. A., Williams R. Temperature-dependent spectral mismatch corrections // IEEE Journal of Photovoltaics, 2015, vol. 5, no. 6, pp. 1692–1697.
- [18] Стребков Д. С., Никитин Б. А., Харченко В. В., Гусаров В. А., Тихонов П. В. Влияние температуры в широком интервале значений на параметры солнечных элементов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2013. № 4. С. 46–48.
- [19] Крат С. А., Крат Н. М., Шаров А. К. Способ коррекции собственной температурной зависимости кремниевых фотоэлектрических преобразователей. Пат. № 2585613, Российская Федерация, 2016, бюл. № 15.
- [20] Акционерное общество «Объединенная ракетно-космическая корпорация». Список продукции. Датчик суммарного теплового потока ФОА 020 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosorck.ru/catalog/preobrazovateli-sistemy-izmereniya-kontrolya-i-diagnostiki/228/> (дата обращения: 21.08.2020).
- [21] Крат С. А. Теплоприемник ФОА 020 как альтернативное средство контроля освещенности при тепловакуумных испытаниях космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XX Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск. 2017. Т. 1. С. 340–342..

PROBLEMS OF IRRADIANCE CHARACTERISTICS MEASUREMENT OF SOLAR SIMULATORS FOR GROUND SPACECRAFT TESTS

**A. A. Shevchuk^{1,3}, O. V. Pastushenko¹, V. V. Dvirniy^{1,2},
G. V. Dvirniy³, A. A. Filatov⁴**

¹ JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

³ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation

⁴ LLC NPO Heliosfera, Saint Petersburg, Russian Federation

The reliability of both spacecraft as a whole and of their systems is confirmed at the stage of complex ground-based experimental tests, including complex thermal vacuum tests. The thermal state of the test object in thermal vacuum chambers is obtaining, in particular, using a solar simulator. Radiometers based on silicon photoelectric converters are most often used to control the irradiance of a solar simulator under conditions of thermal vacuum tests. At the same time, an analysis of the features of silicon photoelectric converters shows that their direct measurement with the accuracy required for ground-based tests of spacecraft is impossible; their output is nonlinear, depends on the received spectrum, their own temperature and has long-term instability. The achieved measurement accuracy directly depends on the number and accuracy of the tools used and the methods of the necessary correction, of which the mismatch correction between the solar simulator spectrum and the solar spectrum is the most difficult and laborious. At the same time, spectrally nonselective heat flux radiometers are free from the above disadvantages. In the course of the experiment we carried out, the significant dependence of the accuracy of measuring the irradiance with radiometers based on silicon photoelectric converters on the received spectrum was confirmed. The conclusion is made that direct measurement by heat flux radiometers of the irradiance of the solar simulator is most justified under the conditions of thermal vacuum tests.

Keywords: thermal vacuum tests, solar simulator, irradiance, spectral mismatch, photoelectric converter, heat flux radiometer.

References

- [1] GOST R 56469–2015. *Apparaty kosmicheskoye avtomaticheskoye. Termobalansnyye i termovakuumnyye ispytaniya* [State Standard R 56469-2015. Automatic spacecrafts. Thermal balance and thermal vacuum tests]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 11 p. (In Russian)
- [2] Kravchenko S. V., Nesterov S. B., Roman'ko V. A., Testoyedov N. A., Khalimanovich V. I., Khristich V. V. *Podhody k sozdaniyu kompleksnykh sistem dlya otrabotki i ispytaniya kosmicheskikh apparatov* [Approaches to creating integrated systems for optimization and testing of spacecraft] // Engineering Journal: Science and Innovation, 2013, no. 1 (13), pp. 149–175. (In Russian)
- [3] Aslanyan R. O., Anisimov D. I., Marchenko I. A., Pantelev V. I. *Imitatory solnechnogo izlucheniya dlya termovakuumnykh ispytaniy kosmicheskogo apparata* [Solar simulators for thermal vacuum tests of spacecraft]. Siberian Journal of Science and Technology, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 323–327 (In Russian).
- [4] GOST R MEK 60904–1–2013. *Pribory fotoelektricheskoye. Chast' 1. Izmereniya vol'tampernykh kharakteristik* [State Standard R IEC 60904–1–2013. Photovoltaic devices. Part 1. Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 12 p. (In Russian)
- [5] GOST R MEK 60904–2–2013. *Pribory fotoelektricheskoye. Chast' 2. Trebovaniya k etalonnym solnechnym priboram* [State Standard R IEC 60904–2–2013. Photovoltaic devices. Part 2. Requirements for reference solar devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 10 p. (In Russian)
- [6] GOST R MEK 60904–7–2013. *Pribory fotoelektricheskoye. Chast' 7. Vychisleniye popravki na spektral'noye nesootvetstviye pri ispytaniyakh fotoelektricheskikh priborov* [State Standard R IEC 60904–7–2013. Photovoltaic devices. Part 7. Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 8 p. (In Russian)

- [7] GOST R MEK 60904–8–2013. *Pribory fotoelektricheskie. Chast' 8. Izmereniye spektral'noy chuvstvitel'nosti fotoelektricheskikh priborov* [State Standard R IEC 60904–8–2013. Photovoltaic devices. Part 8. Measurement of spectral response of a photovoltaic devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 8 p. (In Russian)
- [8] GOST R MEK 60904–9–2016. *Pribory fotoelektricheskie. Chast' 9. Trebovaniya k harakteristikam imitatorov solnechnogo izlucheniya* [State Standard R IEC 60904–9–2016. Photovoltaic devices. Part 9. Solar simulator performance requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 12 p. (In Russian)
- [9] GOST R MEK 60904–10–2013. *Pribory fotoelektricheskie. Chast' 10. Metody opredeleniya lineynosti kharakteristik* [State Standard R IEC 60904–10–2016. Photovoltaic devices. Part 10. Methods of linearity measurement]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 12 p. (In Russian)
- [10] GOST R 55702–2013. *Istochniki sveta elektricheskoye. Metody izmereniya elektricheskikh i svetovykh parametrov* [State Standard R 55702-2013. Electric light sources. Methods of measuring of electrical and luminous characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 44 p. (In Russian)
- [11] GOST R 8.587–2001. *Sredstva izmereniy kharakteristik opticheskogo izlucheniya solnechnykh imitatorov. Metodika poverki* [State Standard R 8.587-2001. Instruments measuring the characteristics of optical radiation of solar simulators. Methods of verification]. Moscow, Gosstandart Publ., 2002. 16 p. (In Russian)
- [12] Krat S. A. *Sobstvennaya temperaturnaya zavisimost' kremnievyykh fotopreobrazovatelej luchistogo potoka pri teplovakuumnykh ispytaniyakh kosmicheskikh apparatov* [Inherent silicon photoelectric converter temperature dependence under space vehicle thermal vacuum tests] // *Reshetnevskie chteniya : materialy XX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Reshetnev readings : materials of the XX International scientific-practical conference]. Krasnoyarsk, 2015, vol. 1, pp. 375–376. (In Russian)
- [13] Schubert F., Spinner D. Solar simulator spectrum and measurement uncertainties // *Energy Procedia*, 2016, no. 92, pp. 205–210.
- [14] Müllejans H., Salis E. Linearity of photovoltaic devices: quantitative assessment with N-lamp method // *Measurement Science and Technology*, 2019, no. 30, 065008 (9 pp). doi: 10.1088/1361-6501/ab1231
- [15] Metzdorf J., Winter S., Wittchen T. Radiometry in photovoltaics: calibration of reference solar cells and evaluation of reference values // *Metrologia*, 2000, no. 37, pp. 573–578.
- [16] Fidanyan G. S., Morozova S. P., Parfent'yev N. A., Katysheva A. A., Lisyanskiy B. E., Sapritskiy V. I. *Ustanovka dlya izmereniya absolyutnoy spektral'noy chuvstvitel'nosti solnechnyykh elementov v standartnykh usloviyakh* [Apparatus for measuring the absolute spectral sensitivity of solar cells under standard conditions] // *Trudy XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po fotoelektronike i priboram nochnogo videniya*, 2016, pp. 258–262. (In Russian)
- [17] Osterwald C. R., Campanelli M., Moriarty T., Emery K. A., Williams R. Temperature-dependent spectral mismatch corrections // *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, vol. 5, no. 6, pp. 1692–1697.
- [18] Strebkov D. S., Nikitin B. A., Kharchenko V. V., Gusarov V. A., Tikhonov P. V. *Vliyanie temperatury v shirokom intervale znachenij na parametry solnechnyykh elementov* [Influence of temperature in a wide range of values on the parameters of solar cells]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2013, no. 4, pp. 46–48. (In Russian)
- [19] Krat S. A., Krat N. M., Sharov A. K. *Sposob korrektsii sobstvennoy temperaturnoy zavisimosti kremnievyykh fotoelektricheskikh preobrazovatelej* [Method for correction of intrinsic temperature dependence of silicon photoelectric converters]. Patent RU 2585613, 2016, bulletin no. 15.
- [20] *Akcionernoe obshchestvo «Ob"edinennaya raketno-kosmicheskaya korporatsiya». Spisok produktsii. Datchik summarnogo teplovogo potoka FOA 020* [Joint Stock Company "United Rocket and Space Corporation". List of products. Total heat flow sensor FOA 020]. Available at: [https://www.rosorkk.ru/catalog/preobrazovately-sistemy-izmereniya-kontrolya-i-diagnosticski/228/](https://www.rosorkk.ru/catalog/preobrazovатели-sistemy-izmereniya-kontrolya-i-diagnosticski/228/) (accessed 21.08.2020). (In Russian)
- [21] Krat S. A. *Teplopriemnik FOA 020 kak al'ternativnoye sredstvo kontrolya osveshchennosti pri teplovakuumnykh ispytaniyakh kosmicheskikh apparatov* [FOA 020 heat receiver as sunlight control alternative under space vehicles' thermal vacuum tests] // *Reshetnevskie chteniya : materialy XIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Reshetnev readings : materials of the XX International scientific-practical conference]. Krasnoyarsk, 2017, vol. 1, pp. 340–342. (In Russian)

Сведения об авторах

Двирный Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор базовой кафедры «Прикладная физика и космические технологии» Сибирского федерального университета. Окончил Московский авиационный институт в 1969 году. Область научных интересов: агрегаты систем космических аппаратов, защита интеллектуальной собственности.

Двирный Гурий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. Окончил

Сибирский федеральный университет в 2008 году. Область научных интересов: наземная экспериментальная отработка конструкций космических аппаратов.

Пастушенко Олег Валерьевич – начальник сектора АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва в 2011 году. Область научных интересов: автоматизация технологических процессов и производств, термовакуумные испытания космических аппаратов и их составных частей.

Филатов Антон Александрович – кандидат технических наук, технический директор ООО «НПО Гелиосфера». Окончил Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики (Технический университет) в 1999 году. Область научных интересов: создание имитаторов Солнца для наземно-экспериментальной отработки космических аппаратов.

Шевчук Андрей Александрович – аспирант Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. Окончил Сибирский федеральный университет в 2019 году. Область научных интересов: электроника, оптика, термовакуумные испытания космических аппаратов.