УДК 621.32; 629.78 Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-672-686

Для цитирования: Шевчук А. А. Альтернативный метод имитации солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 672–686. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-672-686.

For citation: Shevchuk A. A. Alternative method of solar simulation for thermal vacuum tests of spacecraft. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 672–686. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-672-686.

# Альтернативный метод имитации солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов

### А. А. Шевчук

#### АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» Российская Федерация, 662970, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина 52 E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru

Имитаторы солнечного излучения на основе газоразрядных ксеноновых ламп, применяемые для получения теплового состояния объектов термовакуумных испытаний – космических аппаратов, являются одними из ключевых, наиболее сложных и энергозатратных элементов испытательного оборудования. Сложность оптической системы, большое число оптических элементов, необходимость постоянного контроля их состояния, настройки и юстировки высококвалифицированным персоналом значительно усложняют получение требуемых световых характеристик, главным образом – пространственной равномерности энергетической освещенности. Другим общим недостатком является низкая энергоэффективность, не превышающая 10 %. Предложен альтернативный метод имитации солнечного излучения с использованием твердотельных световых источников – высокоэффективных светодиодов с их размещением без громоздкой и сложной оптической системы непосредственно в термовакуумной камере. При этом одной из наиболее сложных проблем адаптации к условиям термовакуумных испытаний является обеспечение требуемых световых характеристик. Необходимый диапазон длин волн и спектральное соответствие получены при помощи комбинирования высокоэффективных светодиодных сборок из светодиодов шести различных длин волн с галогенными лампами. Проведен ряд экспериментов, включающий измерение световых характеристик альтернативных световых источников и математическое моделирование матричного излучателя. В результате подтверждена возможность применения предлагаемого метода для термовакуумных испытаний космических аппаратов; световые характеристики модели соответствуют предъявляемым требованиям, а в части равномерности энергетической освещенности и энергоэффективности – значительно превосходят аналогичные характеристики традиционных имитаторов солнечного излучения.

Ключевые слова: термовакуумные испытания космических аппаратов, имитатор солнечного излучения, светоизлучающий диод, галогенная лампа.

# Alternative method of solar simulation for thermal vacuum tests of spacecraft

# A. A. Shevchuk

JSC Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems" 52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru

Solar simulators based on gas-discharge xenon lamps, used to obtain the thermal state of objects for thermal vacuum testing of spacecraft, are one of the key, most complex and energy-consuming elements of test equipment. The complexity of the optical system, the large number of optical elements, the need for constant monitoring of their condition, tuning and adjustment by highly qualified personnel significantly complicate the obtaining of required luminous characteristics, mainly the spatial uniformity of the irradiance. Another common drawback is their low energy efficiency, which does not exceed 10 %. We proposed an alternative method of solar simulation using solid-state luminous sources – high-efficiency LEDs, with their placement without a bulky and complex optical system directly in a thermal vacuum chamber. At the same time, one of the most difficult problems of adapting to the conditions of thermal vacuum tests is to provide the necessary luminous characteristics. The required wavelength range, spectral match are obtained by combining assemblies of high-efficiency LEDs of six different wavelengths and halogen lamps. We carried out a number of experiments, including measuring the luminous characteristics of alternative luminous sources and mathematical modeling of the matrix emitter. As a result, the possibility of using the proposed method for thermal vacuum tests of spacecraft was confirmed; the luminous characteristics of the model meet the requirements, and in terms of uniformity of irradiance and energy efficiency, they significantly exceed those of traditional solar simulators.

Keywords: thermal vacuum tests of spacecraft, solar simulator, light emitting diode, halogen lamp.

## Введение

Имитаторы солнечного излучения (ИСИ) создают поток импульсного или непрерывного излучения, характеристики которого близки к характеристикам солнечного излучения как заатмосферных (AM0, англ. Air Mass 0), так и наземных (AM1, AM1,5 и др.) условий. Наиболее сложными, энергозатратными и дорогостоящими из них являются ИСИ постоянного излучения, применяемые в термовакуумных испытаниях (ТВИ) космических аппаратов (КА). В ходе ТВИ имитируются условия вакуума и температур, близкие к условиям околоземного космического пространства, а ИСИ, как один из ключевых элементов испытательного оборудования, используется для получения теплового состояния объектов термовакуумных испытаний (ОИ) – КА в целом или их составных частей [1; 2].

Спектр излучения Солнца в условиях открытого космоса близок к спектру излучения абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой 5960 К (рис. 1). Тепловое воздействие Солнца во всем диапазоне длин волн, или энергетическая освещенность (ЭО), определяется как количество солнечного излучения на единицу площади:

$$E = \int_{0}^{\lambda} I(\lambda) d\lambda , \qquad (1)$$

где E – энергетическая освещенность,  $BT/M^2$ ;  $\lambda$  – длина волны, нм;  $I(\lambda)$  – интенсивность солнечного излучения на единицу длины волны,  $BT/M^2$ ·нм.

Среднее значение ЭО Солнца в заатмосферных условиях, или солнечная постоянная, составляет 1366 Вт/м<sup>2</sup>.



Рис. 1. Спектральное распределение солнечного излучения условий АМО

Fig. 1. AM0 spectral distribution

В части световых характеристик к действующим в настоящее время крупногабаритным отечественным ИСИ для ТВИ КА предъявляются следующие основные требования:

- уровень ЭО – 1340–1440 Вт/м<sup>2</sup>;

- неравномерность распределения ЭО в рабочей плоскости до 15 %;

 – спектральное распределение, близкое к заатмосферному спектру Солнца, в диапазоне длин волн 200–2500 нм;

- непараллельность светового потока не более 4° [2].

В качестве световых источников ИСИ для ТВИ КА традиционно используются газоразрядные ксеноновые лампы [3], которые в силу своих особенностей не могут быть размещены непосредственно в термовакуумной камере. Поэтому для получения рабочего поля на ОИ применяют громоздкую и сложную оптическую систему из большого количества отражающих и преломляющих элементов. Световые потоки газоразрядных ксеноновых ламп при помощи первичной оптики фокусируются в оптических смесителях, через узлы оптического ввода направляются во внутреннее пространство термовакуумной камеры, где при помощи одного или нескольких коллимирующих зеркал сложной формы снова расфокусируются, образуя однородное рабочее поле на ОИ. При этом уровень достигаемой пространственной равномерности ЭО прямо зависит от точности настройки и юстировки всех элементов оптической системы и постоянного контроля их состояния.

Пример крупногабаритного ИСИ традиционной конструкции показан на рис. 2.



Рис. 2. Крупногабаритный ИСИ Европейского космического агентства

Fig. 2. ESA large-size solar simulator

#### Постановка задачи

Среди общих недостатков традиционных ИСИ наиболее существенными являются:

 сложность получения высокой точности имитации, в первую очередь, пространственной равномерности ЭО;

– низкая энергоэффективность, обусловленная низким КПД газоразрядных ксеноновых ламп, удаленностью световых источников от ОИ и высокими потерями в сложной оптической системе. Даже при самом тщательном изготовлении и точной юстировке всех оптических элементов энергоэффективность традиционных ИСИ не превышает 10 % [2; 4];

- малый, около 500 ч, ресурс и высокая стоимость световых источников;

 сложность и высокая стоимость эксплуатации с участием высококвалифицированного персонала;

- длительное время подготовки к испытаниям.

Следует отметить, что традиционные ИСИ за несколько десятилетий практически достигли своего совершенства. Дальнейшее улучшение их световых характеристик возможно лишь в небольших пределах и ценой значительного увеличения стоимости и усложнения конструкции.

Несмотря на то, что световые характеристики существующих крупногабаритных отечественных ИСИ отвечают требованиям подавляющего большинства случаев ТВИ, в самое ближайшее время они могут оказаться недостаточными. Например, при происходящем ужесточении требований к автоматическим КА связи, навигации и геодезии, переходе на новые частотные диапазоны возрастают и требования к точностным характеристикам размеростабильных прецизионных конструкций КА, таких как крупногабаритные антенны, антенные панели, ферменные конструкции. При этом на этапе наземной экспериментальной отработки, при подтверждении стабильности их геометрических характеристик в условиях ТВИ, потребуется более высокая точность имитации солнечного излучения, главным образом, в части стабильности и однородности температурного поля.

Следовательно, для радикального повышения точности имитации и снижения стоимости ТВИ с использованием ИСИ необходимы новые, альтернативные методы и решения.

#### Пути решения

До недавнего времени газоразрядные ксеноновые лампы, в силу хорошего спектрального соответствия и высокой мощности, считались хотя и самым дорогим, но практически безальтернативным световым источником. Однако появление и стремительное развитие новых твердотельных световых источников - высокоэффективных светодиодов, сделало возможным создание на их основе простых и эффективных ИСИ [5; 6]. При использовании в ИСИ для ТВИ КА твердотельные источники могут быть размещены непосредственно в термовакуумной камере без громоздкой и сложной оптической системы, в непосредственной близости от ОИ. Наиболее рациональна конструкция излучателя такого ИСИ в виде двухмерного массива (матрицы) с распределенными параметрами [7; 8], состоящая из множества точечных источников – высокоэффективных светодиодов с простыми первичными оптическими элементами (рис. 3). В случае, если расстояние до ОИ в несколько раз превышает расстояния между соседними точечными источниками матрицы, их световые потоки, многократно смешиваясь, образуют достаточно однородное рабочее поле. При этом также рационально составить излучатель из большого количества световых модулей малого размера. Это позволит использовать только минимально необходимое количество модулей в соответствии с фактической конфигурацией ОИ и дополнительно повысить энергоэффективность ИСИ.

Предварительный анализ показывает преимущество ИСИ на основе светодиодов по подавляющему большинству световых, эксплуатационных, технико-экономических характеристик [8]. Более того, уже существуют серийно выпускаемые зарубежными производителями ИСИ на основе светодиодов, например, [9; 10]. Однако все они предназначены для испытаний солнечных фотоэлементов в наземных условиях AM1 или AM1,5, в узком спектральном диапазоне 400–1100 нм и с уровнем ЭО до 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Для адаптации светодиодного ИСИ к условиям ТВИ необходимо решить ряд задач, полностью изменяющих его конструкцию. В первую очередь, необходимо обеспечить:

1. Световые характеристики:

- уровень ЭО, соответствующий солнечной постоянной, не менее 1366 Bт/м<sup>2</sup>;

- спектральный диапазон, расширенный в инфракрасной области, до 2000 нм;

– значительные, в несколько метров, расстояние до объекта испытаний и размеры рабочего поля;

- высокая направленность светового потока без составляющей рассеянного излучения.

2. Тепловой режим:

 термоизоляция излучателя ИСИ с выводом избыточного тепловыделения за пределы термовакуумной камеры;

– термостабилизация кристаллов светодиодов при любых температурных режимах ТВИ.

3. Выбор материалов с минимальным газовыделением, не влияющих на вакуумный режим ТВИ.



Рис. 3. Излучатель ИСИ в виде матрицы из точечных источников

Fig. 3. Emitter of solar simulator in the form of a matrix of point sources

Наиболее сложной из перечисленных задач является обеспечение необходимых световых характеристик. Поскольку максимум интенсивности излучения монохромных светодиодов сосредоточен в узком диапазоне, для получения непрерывного спектра комбинируют излучение нескольких групп светодиодов различных длин волн. Однако для получения высокой направленности светового потока, необходимой для случая ТВИ, каждый светодиод должен иметь первичный оптический элемент, что не позволит разместить достаточное количество групп в пределах матрицы. С другой стороны, главным препятствием для получения расширенного до 2000 нм спектра ИСИ является высокая стоимость, узкая полоса излучения и низкая эффективность существующих инфракрасных светодиодов.

Для решения проблемы предложен простой и эффективный способ комбинирования светодиодов различных длин волн в видимой области и галогенных ламп накаливания в преимущественно инфракрасной области солнечного спектра. Более того, если спектры этих двух видов световых источников имеют область совместного излучения, число необходимых для получения непрерывного спектра светодиодов различных длин волн может быть уменьшено в несколько раз. Это позволяет применить интегральные светодиодные сборки из нескольких различных светодиодов с минимальными размерами излучающей поверхности совместно с одним общим оптическим элементом [11].

Таким образом, наиболее рационально выполнить излучатель ИСИ на основе комбинирования высокоэффективных светодиодных сборок в преимущественно видимой области и галогенных ламп в примущественно инфракрасной области, размещенных в матрице с равномерным чередованием. Пример размещения комбинированного излучателя в горизонтальной термовакуумной камере показан на рис. 4.



Рис. 4. Размещение комбинированного излучателя ИСИ в термовакуумной камере



#### Экспериментальная часть

Для проверки соответствия комбинированного матричного излучателя ИСИ предъявляемым требованиям проведено моделирование его световых характеристик.

В качестве световых источников в преимущественно видимой области выбраны высокоэффективные светодиодные сборки LED ENGIN LZ7 производителя OSRAM [12] из светодиодов шести длин волн и размерами излучающей поверхности 7х7 мм (табл. 1). Максимальная потребляемая светодиодной сборкой электрическая мощность достигает 50 Вт.

Таблица 1

Основные парамет	ры интеграл	ьной светод	иодной сборк	и LED	ENGIN	LZ7

Параметр	Кристаллы светодиодной сборки					
Длина волны, нм	449	495	519	522	600	622
Количество в сборке	1	1	1	2	1	1
Прямое напряжение, В	3,2	3,8	3,5	3,2	3,6	2,4
Максимальный прямой ток, А	3	1	3	2,5	1,5	2,5
Максимальная температура в режиме работы, °С	125					
Температура в неработающем состоянии, °С	-40 +150					

Суммарное излучение выбранной светодиодной сборки ограничено красной областью спектра, что предполагает использование в преимущественно инфракрасной области галогенных ламп накаливания с максимумом излучения около 750 нм. Спектр излучения галогенных ламп близок к излучению АЧТ (рис. 5), соответствующая максимуму излучения длина волны и температура АЧТ, или цветовая температура лампы, связаны между собой формулой:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \cdot 10^9 \,, \tag{2}$$

где  $\lambda_{\text{max}}$  – длина волны, соответствующая максимуму излучения, нм; *T* – цветовая температура, К; *b* – постоянная Вина, равная 2,89777 · 10<sup>-3</sup> К·м.





Fig. 5. Spectral distributions of halogen lamps of different color temperatures

При этом предпочтительны лампы с осевым расположением нити накаливания, что позволяет использовать с ними простые и эффективные первичные оптические элементы – параболические рефлекторы.

Наиболее доступны и полностью отвечают перечисленным требованиям автомобильные галогенные лампы дальнего света H1, значения цветовых температур которых находятся в широком диапазоне (рис. 6).





Fig. 6. Color temperatures of H1 halogen lamps from different manufacturers

В качестве светового источника в преимущественно инфракрасной области выбраны галогенные лампы H1 производителя OSRAM с цветовой температурой 3700 К и максимальной потребляемой мощностью 55 Вт.

Первичная оптика для световых источников выбрана из числа серийно выпускаемых компактных оптических элементов со световым распределением круглой формы и наименьшим углом распределения 6°. Для светодиодных сборок выбраны TIR оптические элементы, основанные на принципе полного внутреннего отражения (англ. Total Internal Reflection) [13; 14], для галогенных ламп – параболические рефлекторы. Исходные значения световой мощности и спектральные распределения световых источников измерены в нормальных условиях. Для измерения спектральных распределений использована система измерения спектра на основе двух монохроматров МДР-206 и ПК со специализированным программным обеспечением, позволяющим определять интегральные значения ЭО. Монохроматоры откалиброваны по эталонным световым источникам на основе лампы накаливания и дейтериевой лампы. Дополнительно для измерений уровней ЭО использован спектрально неселективный тепловой радиометр ФОА 020 с малым, практически точечным размером измерительной поверхности, откалиброванный методом прямых измерений по Государственному вторичному эталону единиц силы излучения и энергетической освещенности непрерывного оптического излучения 2.1.ZZA.0010.2015.

Спектральное распределение, полученное комбинированием светодиодов шести длин волн и галогенной лампы с раздельным регулированием их электрической мощности, показано на рис. 7.



Рис. 7. Спектральное распределение комбинированного светового источника

Fig. 7. Spectral distribution of the combined luminous source

Соответствие спектру АМ0 определено по методике, приведенной в ГОСТ Р МЭК 609040-9 [15]. Следует отметить, что эти требования избыточны для случая ТВИ, поскольку [15] классифицирует характеристики ИСИ для испытаний крайне чувствительных к спектру солнечных фотоэлементов. Однако даже в этом случае спектральное соответствие находится в пределах 0,75–1,25, что соответствует высшему классу А (табл. 2).

Таблица 2

Диапазоны длин волн, нм	400–500	500-600	600-700	700-800	800–900	900-1100
Спектральное соответствие	0,79	1,04	0,92	1,05	1,04	0,98

Спектральное соответствие, полученное комбинированием световых источников

Дальнейшее моделирование характеристик одиночного светового модуля и массива из большого числа световых модулей проведено в специализированном программном обеспечении для оптического проектирования Zemax OpticStudio.

На первом этапе проведено моделирование выбранных одиночных световых источников с первичными оптическими элементами. В качестве исходных данных использованы результаты измерений световых характеристик, 3D-модели световых источников и их первичных оптических элементов. Результаты моделирования (рис. 8, 9) показали хорошее, с точностью до 5 %, соответствие между результатами измерений и полученными моделями.



Puc. 8. Результаты моделирования светодиодной сборки с TIR оптическим элементом Fig. 8. Simulation results for the LED assembly with TIR



Рис. 9. Результаты моделирования галогенной лампы Н1 с параболическим рефлектором

Fig. 9. Simulation results for the H1 halogen lamp with parabolic mirror

На следующем этапе в Zemax OpticStudio смоделированы световые характеристики одиночного светового модуля размерами  $310 \times 310$  мм, или 0,1 м<sup>2</sup> (рис. 10), состоящего из 18 светоди-

одных сборок и 18 галогенных ламп накаливания с первичными оптическими элементами. Расчетная потребляемая модулем электрическая мощность по результатам моделирования не превысила 720 Вт, при этом мощность выбранных световых источников находилась в пределах половины от максимальной.



Рис. 10. 3D-модель светового модуля на основе 18 светодиодных сборок и 18 галогенных ламп

Fig. 10. 3D model of a luminous module based on 18 LED assemblies and 18 halogen lamps

Полученные световые характеристики одного модуля использованы далее как исходные данные для моделирования в Zemax OpticStudio массива из 169 световых модулей. Поскольку практический интерес, в силу размерных ограничений большинства термовакуумных камер, представляют расстояния до ОИ не более 3 м, моделировались расстояния от 0,5 до 3 м с шагом 0,5 м.

При определении уровня и неравномерности распределения ЭО рабочая плоскость разбита на сетку размером  $20 \times 20$  участков (пикселей). Средний уровень ЭО в рабочей плоскости *E*, Вт/м<sup>2</sup>, рассчитан по формуле

$$E = \frac{\sum_{j=1}^{N_X \cdot N_Y} E_{ij}}{N_X \cdot N_Y},$$
(3)

где  $E_{ij}$  – интегрированное значение ЭО в каждом из 400 участков сетки 20 (*x*)×20 (*y*), Вт/м<sup>2</sup>; *Nx* – количество измерений по координате *x*; *Ny* – количество измерений по координате *y*.

Отклонение от среднего уровня ЭО для каждого измеренного участка  $Q_{ij}$ , %, рассчитано по формуле

$$Q_{ij} = \left| 100 - \frac{E_{ij} \cdot 100}{E} \right|. \tag{4}$$

Общее значение неравномерности распределения ЭО в рабочей плоскости Q, %:

$$Q = \frac{\sum_{j=1}^{N_X \cdot N_Y} Q_{ij}}{N_X \cdot N_Y}.$$
(5)

Результаты моделирования в части уровня и равномерности распределения ЭО для каждого из шести расстояний показаны в графическом виде на рис. 11 и сведены в общем графике на рис. 12. Результаты в части параллельности светового потока показаны на рис. 13 и в табл. 3.



Рис. 11. Моделирование массива из световых модулей на различных расстояниях от 0,5 до 3 м

Fig. 11. Modeling of luminous modules array at different distances



Рис. 12. Зависимость уровня и неравномерности распределения ЭО от расстояния до ОИ

Fig. 12. Dependence of the level and non-uniformity of the irradiance on the distance to the test object



Рис. 13. Зависимость концентрации энергии ИСИ от угла распределения

Fig. 13. Dependence of the energy concentration of solar simulator on the distribution angle

Таблица 3

#### Зависимость концентрации энергии ИСИ от угла распределения

	Угол ф, град.			
Концентрация энергии истт в пределах угла ф, 70	4	6		
Горизонтальная плоскость	85	96		
Вертикальная плоскость	84	96		

# Результаты и обсуждение

Результаты моделирования (рис. 11–13, табл. 2–4) показывают, что полученное значение энергоэффективности не менее чем в два раза превышает аналогичное значение традиционных ИСИ. Значение пространственной неравномерности ЭО, как минимум, в три раза ниже максимально допустимого значения 15 %. Модель оптимизирована для достаточного в большинстве случаев ТВИ расстояния 1,7 м до ОИ, на котором поддерживается уровень ЭО 1400 Bт/м<sup>2</sup> и низкая неоднородность, равная 3,5 %. Определенное по методике [15] соответствие спектру АМО находится в пределах высшего класса А.

Таблица 4

#### Сравнительные световые характеристики модели и традиционных ИСИ для ТВИ КА

Параметр	Модель	Традиционные ИСИ	
Неравномерность распределения ЭО в рабочей плоскости, %	5,2–3,3	до 15	
Энергоэффективность, %	19,5	5-10	
Спектральное соответствие по методике ГОСТ Р МЭК 60904-9	класс А		

Следует особо отметить, что полученные результаты являются далеко не предельными.

На рис. 11 хорошо видно, что общий уровень ЭО массива световых модулей достигает максимальных значений в центре освещаемой площади, равномерно снижаясь по направлению к краям. Поэтому пространственная равномерность ЭО на уровне всего массива может быть дополнительно повышена раздельной регулировкой мощности световых модулей. Пространственная равномерность ЭО на уровне одного светового модуля может быть также повышена при применении первичных оптических элементов со световыми распределениями не круглой, а прямоугольной или шестиугольной формы.

Также очевидно, что применение первичных оптических элементов с меньшим углом распределения еще больше повысит параллельность светового потока, равномерность распределения ЭО и предельное расстояние до объекта испытаний. Таким образом, полученные световые характеристики могут быть значительно улучшены при применении изготовленных с учетом перечисленных требований первичных оптических элементов.

#### Заключение

Появление последних разработок световых источников – высокоэффективных светодиодов открывает возможности для реализации альтернативного метода имитации солнечного излучения. Результаты проведенного моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Теоретически подтверждается возможность создания имитатора солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов с размещением световых источников непосредственно в термовакуумной камере.

2. Световые характеристики модели соответствуют предъявляемым требованиям.

3. В части точности имитации солнечного излучения и энергоэффективности полученные характеристики модели значительно превосходят аналогичные характеристики имитаторов солнечного излучения традиционной конструкции.

Следующим логическим этапом становится создание действующей модели альтернативного имитатора солнечного излучения и экспериментальное подтверждение его характеристик в реальных условиях термовакуумных испытаний.

#### Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 56469–2015. Аппараты космические автоматические. Термобалансные и термовакуумные испытания. Введ. 2015-01-15. М. : Стандартинформ, 2015. 11 с.

2. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов / С. В. Кравченко, С. Б. Нестеров, В. А. Романько и др. // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1 (13). С. 149–175.

3. Wang W., Laumert B. Simulate a 'Sun' for Solar Research : A Literature Review of Solar Simulator Technology. KTH Royal Institute of Technology website. 2014 [Электронный ресурс]. URL: http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-154262 (дата обращения: 15.11.2021).

4. Крат С. А. Повышение эффективности имитаторов солнечного излучения // Сибирский журнал науки и технологий. 2011. № 2 (35). С. 124–127.

5. Solid- State Solar Simulator / A. M. Bazzi, Z. Klein, M. Sweeney et al. // IEEE Transactions on Industry Applications. 2012. No. 48. P. 1195–1202.

6. Reynolds K. LED-based sun-simulator design: technical and commercial considerations // Photonics Spectra. March 2015. P. 54–58.

7. Plita F. Optical design of a fully LED-based solar simulator. PhD thesis. Loughborough, Loughborough University, July 2015. 186 p.

8. Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной отработки космических аппаратов / Г. В. Двирный, А. А. Шевчук, В. В. Двирный и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 271–280.

9. Сайт производителя оптического оборудования Newport. Имитатор солнечного излучения VeraSol-2 LED класса AAA [Электронный ресурс]. Irvine, CA 92606, United States, 2021. URL:https://www.newport.com/f/class-aaa-led-solar-simulators / (дата обращения: 17.11.2021).

10. Сайт производителя фотоэлектронных преобразователей ECOPROGETTI. Имитатор солнечного излучения Ecosun Plus [Электронный ресурс]. Padova, Italy, 2021 [Электронный ресурс]. URL: https://ecoprogetti.com/sun-simulator-for-solar-panel-testing-in-led-class-aaa/ (дата обращения: 17.11.2021).

11. Двирный Г. В., Шевчук А. А., Пастушенко О. В. Пути повышения технических и эксплуатационных характеристик имитаторов солнечного излучения для наземной отработки космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф., 10–13 нояб. 2020 г. / СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск, 2020. Ч. 1. С. 268–270.

12. Сайт призводителя OSRAM. OSRAM LED Engin LuxiGen<sup>TM</sup> LED Emitters. [Электронный pecypc]. URL: https://www.osram.us/ledengin/products/luxigen/lz7.jsp (дата обращения: 04.06.2021).

13. Talpur T., Herkommer A. TIR collimator designs based on point source and extended source methods // Proceedings of SPIE. 2015. Vol. 9629. P. 962906–962916.

14. Moiseev M. A., Doskolovich L. L. Design of TIR optics generating the prescribed irradiance distribution in the circle region // Journal of the Optical Society of America A. 2012. Vol. 29(9). P. 1758–1763.

15. ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016. Приборы фотоэлектрические. Ч. 9. Требования к характеристикам имитаторов солнечного излучения. Введ. 2017-10-01. М., Стандартинформ, 2017. 12 с.

#### References

1. GOST R 56469–2015. Apparaty kosmicheskiye avtomaticheskiye. Termobalansnyye i termovakuumnyye ispytaniya. [State Standard R 56469-2015. Automatic spacecrafts. Thermal balance and thermal vacuum tests]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 11 p.

2. Kravchenko S. V., Nesterov S. B., Roman'ko V. A., Testoyedov N. A., Khalimanovich V. I., Khristich V. V. [Approaches to creating integrated systems for optimization and testing of spacecraft]. *Inzhenerniy zhurnal: nauka i innovatsii.* 2013, No. 1 (13), P. 149–175 (In Russ.).

3. Wang W., Laumert B. Simulate a 'Sun' for Solar Research : A Literature Review of Solar Simulator Technology. KTH Royal Institute of Technology website. 2014. Available at: http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-154262 (accessed: 15.11.2021).

4. Krat S. A. [Increase of solar radiation simulator efficiency]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy*. 2011, No. 2 (35), P. 124–127 (In Russ.).

5. Bazzi A. M., Klein Z., Sweeney M. et al. Solid-State Solar Simulator. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2012, No. 48, P. 1195–1202.

6. Reynolds K. LED-based sun-simulator design: technical and commercial considerations. *Photonics Spectra*. March 2015, pp. 54-58.

7. Plita F. Optical design of a fully LED-based solar simulator. PhD thesis. Loughborough, Loughborough University, July 2015. 186 p.

8. Dvirniy G. V., Shevchuk A. A., Dvirniy V. V., Elfimova M. V., Krushenko G. G. [Analysis of LED-based solar simulator development capability for spacecraft ground testing applications]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy.* 2018, Vol. 19, No. 2, P. 271–280 (In Russ).

9. VeraSol-2 LED Class AAA Solar Simulator. Newport, Irvine, CA 92606, United States, 2021. Available at: https://www.newport.com/f/class-aaa-led-solar-simulators (accessed: 17.11.2021).

10. Sun Simulator For Solar Panel Testing In LED Class A+A+A+. ECOPROGETTI, Padova, Italy, 2021. Available at: https://ecoprogetti.com/sun-simulator-for-solar-panel-testing-in-led-class-aaa (accessed: 17.11.2021).

11. Dvirniy G. V., Shevchuk A. A., Pastushenko O. V. [Ways to improve the technical and operational characteristics of solar simulators for ground testing of spacecraft]. *Reshetnevskiye chteniya : materialy XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials XIV Int. scient. and pract. conf. "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2020, Vol. 1, P. 268–270 (In Russ).

12. OSRAM LED Engin LuxiGen<sup>TM</sup> LED Emitters. OSRAM, 2021. URL: https://www.osram.us/ledengin/products/luxigen/lz7.jsp (accessed: 04.06.2021).

13. Talpur T., Herkommer A. TIR collimator designs based on point source and extended source methods. Proceedings of SPIE. 2015, Vol. 9629, P. 962906 962916.

14. Moiseev M. A., Doskolovich L. L. Design of TIR optics generating the prescribed irradiance distribution in the circle region. Journal of the Optical Society of America A. 2012, Vol. 29(9), P. 1758–1763.

15. 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.

🚾 Шевчук А. А., 2021

Шевчук Андрей Александрович – инженер по наладке и испытаниям отдела термовакуумных испытаний, Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru.

**Shevchuk Andrey Alexandrovich** – testing engineer of the thermal vacuum tests department, JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems". E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru.