

**ВЫРАВНИВАНИЕ ПОЛЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ КОНИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА**

А. В. Колинчук

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»
Украина, 61070, г. Харьков, ул. Чкалова, 17
E-mail: lunya18111991@yandex.ru

Актуальной проблемой в области освоения космического пространства в наше время остается моделирование условий космического полета для испытаний космических аппаратов и отдельных их систем на Земле. Рассмотрена задача создания имитатора солнечного излучения для наземных испытаний солнечных батарей космического назначения на основе импульсной ксеноновой лампы удлиненной цилиндрической формы и конического рефлектора. Применение импульсных ксеноновых ламп в качестве источника излучения в имитаторах солнечного излучения позволяет воспроизводить излучение Солнца с достаточной степенью приближения по спектру и плотности потока. Малорасходящийся поток излучения можно получить с помощью осесимметричных зеркал (параболических, параболоцилиндрических, конических), в фокусах которых находятся источники излучения. Изложены аспекты создания трехмерной модели имитатора солнечного излучения для исследования его характеристик, а также для проведения экспериментальной проверки адекватности созданной трехмерной модели. Предложены два способа получения потока излучения имитатора солнечного излучения, соответствующего требуемым показателям по плотности, коллимированности потока, его спектру. Как искусственная расфокусировка источника излучения и конического отражателя, так и применение градиентного тонирования поверхности источника излучения либо конического отражателя позволяют уменьшить неравномерность распределения плотности потока излучения в 3 раза. Сделан вывод о принципиальной применимости и эффективности предложенных способов выравнивания неравномерности падающего светового потока для исследуемой оптической схемы. Предложенная конструкция имитатора солнечного излучения проста в техническом исполнении, не требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат для своего функционирования. Предполагается дальнейшее исследование предложенной модели имитатора солнечного излучения и его апробации в лабораторных условиях.

Ключевые слова: имитатор солнечного излучения, оптическая схема, отражатель, источник излучения, неоднородность потока излучения, искусственная расфокусировка, градиентное тонирование.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 352–356

**ALIGNMENT OF THE FIELD OF ILLUMINATION
OF THE SOLAR SIMULATOR BASED ON A CONICAL REFLECTOR**

A. V. Kolinchuk

National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”
17, Chkalova Str., Kharkov, 61070, Ukraine
E-mail: lunya18111991@yandex.ru

Simulation of space flight conditions for testing of spacecrafts and their individual systems on the Earth is an urgent problem in the field of space exploration today. Task of creating a solar simulator for ground testing of space-purpose solar cells based on pulsed xenon prolonged cylindrical lamp and a conical reflector is considered. Application of pulsed xenon lamp as a radiation source in solar simulators allows to reproduce the radiation of the sun closely by spectrum and flux density. Few divergent radiation flux can be obtained using axially symmetric mirrors (parabolic, parabolic-cylindrical, conical) with the sources of radiation in their focus. Important aspects of creating three-dimensional models of solar simulator for the study of its characteristics, as well as carrying out experimental verification of the adequacy of the created three-dimensional model are stated. Two methods are proposed to produce a solar simulator radiation flux corresponding to the required density, flux collimation, its spectrum. As artificial defocusing of the radiation source and the conical reflector as application of gradient shading the surface of the radiation source or conical reflector can reduce the nonuniformity of distribution of the radiant flux density by three times. Proposed ways of the incident radiation flux nonuniformity alignment for the testing of optical schemes are fundamentally applicable and effective. The proposed design of solar simulator is easy in technical execution, does not require significant

capital and operating costs for its functioning. Further study of the proposed solar simulator model and its testing in the laboratory are assumed.

Keywords: solar simulator, optical system, reflector, light source, the uniformity of the radiation flux, artificial defocus, gradient shading.

Введение. В области освоения космического пространства на сегодняшний день актуальным остается вопрос адекватного моделирования условий космического полета для испытаний космических аппаратов (КА) и отдельных их систем на Земле. Воздействие космического пространства на КА является комплексным и многофакторным, что обуславливает необходимость предварительных наземных испытаний материалов и отдельных компонентов КА в условиях, максимально приближенных к полетным. В настоящее время эта задача успешно решается и реализуется в специализированных камерах с имитаторами солнечного излучения (ИСИ) и рядом других устройств.

Однако остро стоит проблема снижения стоимости разработки и эксплуатации солнечных имитаторов для испытаний солнечных батарей (СБ) с сохранением достаточного уровня точности воспроизведения основных параметров излучения: плотности, спектра, степени параллельности потока излучения [1–3]. Создание таких приборов является чрезвычайно сложным, затратным и энергоемким процессом, требует квалифицированного обслуживания, поэтому на практике при создании ИСИ находят разумный компромисс между точностью воспроизведения основных параметров и стоимостью установки.

Важнейшим аспектом при создании ИСИ является получение одновременно коллимированного и однородного потока излучения. Эта сложная инженерная и техническая задача традиционно решается путем смешивания пучков лучей различными способами в сложных системах, содержащих спрямляющие линзы и зеркала [4–8]. Однако такой способ получения равномерного потока излучения затратен и, как правило, вызывает громоздкость конструкций ИСИ.

Целью данной статьи является представление результатов исследования в области создания ИСИ, сочетающего достаточный уровень точности воспроизведения необходимых параметров солнечного излу-

чения, простоту конструкции и низкую стоимость создания и эксплуатации установки.

Создание и испытание модели. После изучения современного состояния развития области разработки ИСИ был сделан вывод о целесообразности применения импульсных ксеноновых ламп в качестве источника излучения в ИСИ [9]. Использование данного типа ламп позволяет воспроизводить солнечное излучение с достаточной степенью приближения по спектру и плотности излучения.

Малорасходящийся поток излучения можно получить с помощью осесимметричных зеркал различной конфигурации (параболических, параболоцилиндрических, конических), в фокусах которых находятся достаточно мощные источники излучения.

В лаборатории кафедры нетрадиционных источников энергии и космической техники Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» был разработан опытный образец [10] импульсного имитатора солнечного излучения, предназначенный для измерения параметров ФЭП. Его оптическая система состоит из протяженного импульсного источника излучения (импульсная ксеноновая лампа типа ХОР-15 фирмы Philips [11]: мощность в установившемся режиме работы – 1500 Вт; длина – 395 мм, диаметр – 12 мм), смонтированного в корпус с параболоцилиндрическим концентратором излучения (серийный стробоскоп Асте BF-1500NA [12]) вдоль фокусной линии концентратора (рис. 1). Рабочее поле прямоугольной формы размерами 0,8×0,8 м (площадью 0,64 м²) отдалено от источника излучения на расстояние 0,3 м. Данный имитатор подробно описан в работе [13].

Экспериментальные исследования вышеописанной установки показали соответствие характеристик потока излучения, производимого имитатором, необходимым параметрам потока солнечного излучения по спектру и плотности излучения в достаточной степени ($\pm 2,5\%$) [13].



Рис. 1. Внешний вид оптической системы SRS

Fig. 1. The look of SRS optical system

Однако исследование распределения потока излучения ИСИ по поверхности рабочего поля показало высокую степень неравномерности такого распределения. Данная неоднородность поля распределения принципиальна для потока, отраженного от параболического рефлектора в выбранной оптической схеме. В таком ИСИ необходимо решить проблему обеспечения равномерного распределения светового потока в области рабочего поля.

Для поиска и апробации эффективных способов устранения вышеуказанной неравномерности распределения плотности излучения в исследуемом ИСИ необходимо использовать адекватную цифровую модель установки, так как физическая экспериментальная отработка в данном случае является весьма дорогостоящей.

Для исследования солнечного имитатора была выбрана САД-система TracePro 6.0, предназначенная для трехмерного моделирования и оптического анализа. В данной среде была создана трехмерная модель оптической схемы лабораторной установки ИСИ (рис. 2) и проведена экспериментальная проверка ее соответ-

ствия физическому прототипу. Было проведено сравнение характеристик потока излучения, полученных с лабораторной установки ИСИ и его трехмерной модели. Результаты эксперимента подтвердили возможность исследования характеристик ИСИ с помощью построенной модели [13]. Такой вывод позволил проведение дальнейшего использования 3D-модели для усовершенствования импульсного имитатора.

Способы выравнивания распределения светового потока в рабочей области ИСИ. После создания трехмерной модели установки как адекватного инструмента для исследования свойств ИСИ было проведено дальнейшее преобразование модели. Теоретически необходимый угол коллимации потока излучения ИСИ можно получить при использовании однозеркальной осевой оптической схемы на основе конического зеркала с углом раскрытия 90° и протяженным импульсным источником излучения, совмещенным по осям. Трехмерная модель исследуемого ИСИ была преобразована и приведена в соответствие с описанной схемой с коническим рефлектором (рис. 3), а далее протестирована в среде моделирования TracePro 6.0.

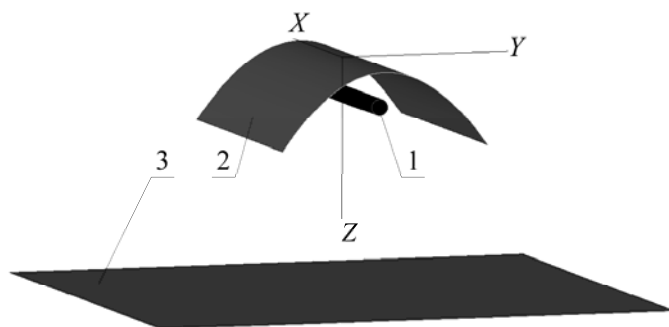


Рис. 2. Трехмерная модель лабораторной установки SRS:
1 – источник излучения; 2 – параболический рефлектор; 3 – рабочее поле

Fig. 2. The 3d model of the laboratory SRS installation:
1 – radiation source; 2 – paracylinder reflector; 3 – operating field

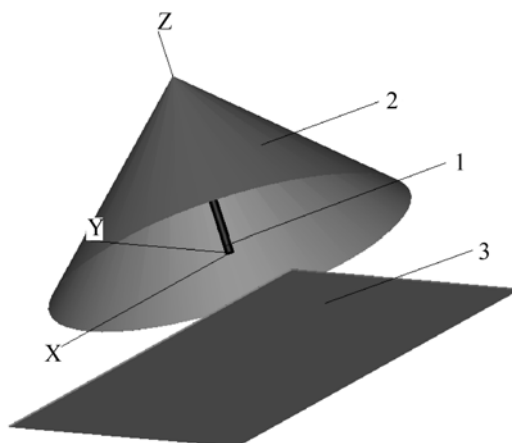


Рис. 3. Трехмерная модель имитатора солнечного излучения с коническим рефлектором (угол раскрытия 90°):
1 – источник излучения; 2 – конический рефлектор; 3 – рабочее поле

Fig. 3. The 3d SRS model with a conical reflector (with opening angle 90°):
1 – radiation source; 2 – paracylinder reflector; 3 – operating field

Было подтверждено, что данная схема обеспечивает поворот основного пучка, нормального к излучающей поверхности лампы, в направлении, параллельном оси излучателя, после одного отражения и обеспечивает необходимую параллельность светового потока. Возникающая при этом принципиальная неравномерность распределения плотности отраженного потока в области рабочего поля [14] должна быть преодолена.

Преодоление данной неравномерности в комплексе с преимуществами выбранного источника излучения и оптической схемы позволит создать установку со сравнительно низкой себестоимостью и стоимостью эксплуатации и в относительно простой конструкции, одновременно удовлетворяя требуемому уровню параметров светового потока, создаваемого имитатором.

Для выравнивания распределения плотности потока излучения в рабочем поле было предложено два принципиально новых способа:

- искусственная расфокусировка источника излучения и конического отражателя [14];
- градиентное тонирование поверхности источника излучения либо конического отражателя [15].

Способ искусственной расфокусировки заключается в отклонении конического отражателя от оси излучателя на определенный угол относительно оси ординат таким образом, что рабочее поле ИСИ остается перпендикулярным продольной оси источника излучения, а перераспределение отраженного потока излучения по рабочей области происходит из-за изменения угла наклона рефлектора.

Для трех вариантов рабочих областей разного размера, расположенных в области наибольшей интенсивности падающего излучения, были определены углы наклона, обеспечивающие наименьшую степень неравномерности распределения потока излучения. Исследование влияния угла искусственной расфокусировки на равномерность освещенности рабочих зон показало, что минимальная неравномерность среди рассмотренных вариантов может быть достигнута для площадки 100×100 мм при угле расфокусировки, равном 10° , и составит 8,5 %, что почти в 3 раза меньше, чем без использования искусственной расфокусировки [14].

Способ градиентного тонирования поверхности источника излучения либо конического отражателя для снижения неравномерности распределения падающего светового потока заключается в следующем. Для рассматриваемого ИСИ определяется базовый уровень плотности светового потока, который обеспечивается по всей площади рабочей области. Излучение, превышающее определенный базовый уровень, «отсекается» путем нанесения градиентно-тонированного покрытия в виде тонкой пленки на лампу – источник излучения либо на конический отражатель. От степени тонирования отражающей поверхности рефлектора зависит ее коэффициент отражения: чем больше степень тонировки области, тем ниже коэффициент отражения. Градиентное тонирование лампы-излучателя влияет на коэффициент пропускания (прозрачность) поверхности лампы-излучателя: с увели-

чением степени тонировки уменьшается пропускная способность данной области поверхности лампы.

Вычисление необходимых коэффициентов отражения для пленочного покрытия рефлектора и коэффициентов пропускания для покрытия излучателя позволило определить неравномерность распределения плотности потока падающего излучения для двух способов нанесения покрытия для трех вариантов рабочих зон различного размера, расположенных в области наибольшей интенсивности и равномерности падающего излучения. Минимальная неравномерность среди рассмотренных вариантов рабочих областей достигнута для площадки 400×200 мм при нанесении покрытия на конический отражатель и составляет 9,8 %, что почти в 3 раза меньше, чем без нанесения градиентного тонирования [15].

Таким образом, сделан вывод о принципиальной применимости и эффективности предложенных способов выравнивания неравномерности падающего светового потока для исследуемой оптической схемы.

Заключение. Рассмотрены этапы создания и исследования имитатора солнечного излучения для наземных испытаний солнечных батарей космического назначения на основе импульсной ксеноновой лампы удлиненной цилиндрической формы. Создана трехмерная модель ИСИ, отвечающая основным требованиям к потоку излучения по спектральному составу, плотности излучения, коллимированности и равномерности распределения плотности излучения, падающего на рабочую область. Предложенные способы позволяют создать соответствующий требованиям поток излучения ИСИ просто и эффективно. Конструкция ИСИ проста для технического исполнения, не требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат для своего функционирования.

Предполагается проведение дальнейшего экспериментального исследования предложенной модели имитатора солнечного излучения и его апробация в условиях лаборатории.

Библиографические ссылки

1. Колесников А. В. Испытания космических аппаратов : конспект лекций. М. : МАИ, 2007. 105 с.
2. Ковальский В. Я. Имитаторы излучения Солнца и измерение характеристик солнечных батарей и их элементов (Обзор) // Гелиотехника. 1972. № 3. С. 45–51.
3. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. М. : Энергоатомиздат, 1983. 365 с.
4. Крат С. А. Повышение эффективности имитаторов солнечного излучения // Вестник СибГАУ. 2011. № 2. С. 124–128.
5. Крат С. А. Тепловакуумная обработка космических аппаратов: развитие новых тенденций // Вестник СибГАУ. 2010. № 4. С. 126–129.
6. Крат С. А. Теоретические основы способа суммирования световых потоков от отдельных источников излучения для наземной отработки космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2011. № 4. С. 131–134.
7. Domínguez C., Antón I., Sala G. Solar simulator for concentrator photovoltaic systems // Optics Express, 2008. T. 16, № 19. P. 14894–14901.

8. Optical investigation of a sun simulator for concentrator PV applications / C. Rapp [et al.] // *Optics Express*. 2015. T. 23, № 19. P. A1270–A1279.

9. Колинчук А. В., Шепетов Ю. А. Имитаторы солнечного излучения для испытаний фотоэлектрических батарей космического назначения // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2015. № 3 (120). С. 73–79.

10. Гудкова А. В., Губин С. В., Белоконов В. И. Термостабилизация фотоэлектрических преобразователей для измерения ВАХ с импульсным источником света // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. // М-во образования и науки Украины ; Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2012. Вып. 57. С. 187–196.*

11. BG Series Data [Электронный ресурс]. URL: http://www.pro-design.com.au/product_info.php?product_id=433 (дата обращения: 10.3.2017).

12. Acme BF-1500NA [Электронный ресурс]. URL: <http://hitonline.ua/products/stroboskopi/acme-bf-1500na.html>. (дата обращения: 10.3.2017).

13. Колинчук А. В., Шепетов Ю. А. Экспериментальная проверка модели поля освещенности имитатора солнечного излучения с импульсным источником // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2016. № 5(132). С. 35–40.

14. Колинчук А. В., Шепетов Ю. А. Использование искусственной расфокусировки для выравнивания светового потока в рабочей области имитатора солнечного излучения на основе конического рефлектора // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2016. № 1(128). С. 58–63.

15. Колинчук А. В., Шепетов Ю. А. Использование градиентного тонирования для выравнивания светового потока в рабочей области имитатора солнечного излучения на основе конического рефлектора // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2016. № 3 (130). С. 30–36.

References

1. Kolesnikov A. V. *Konspekt lektsiy po kursu "Ispytaniya kosmicheskikh apparatov"* [Lecture notes of the course "Spacecraft Testing"]. Moscow, MAI Publ., 2007, 105 p.

2. Koval'skij V. Ja. [Solar simulators and characteristics measurement of solar cells and their components Performance (Overview)]. *Geliotekhnika*. 1972, No. 3, P. 45–51 (In Russ.).

3. Koltun M. M. *Optika i metrologiya solnechnykh jelementov* [Optics and metrology of solar cells]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 365 p.

4. Krat S. A. [Improving the efficiency of solar simulators]. *Vestnik SibGAU*. 2011, No. 2, P. 124–128 (In Russ.).

5. Krat S. A. [Thermal vacuum testing of spacecraft: development of new trends]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 4, P. 126–129 (In Russ.).

6. Krat S. A. [Theoretical foundations of the method of summation of the light fluxes from separate radiation sources for ground testing of spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2011, No. 4, P. 131–134 (In Russ.).

7. Dominguez C., Antón I., Sala G. Solar simulator for concentrator photovoltaic systems. *Optics Express*. 2008, Vol. 16, No. 19. P. 14894–14901.

8. Rapp C., Straub V., van Rooyen D. W., Thor W. Y., Siefert G., Bett A. W. Optical investigation of a sun simulator for concentrator PV applications. *Optics Express*. 2015, Vol. 23, No. 19, P. A1270–A1279.

9. Kolinchuk A. V., Shepetov Ju. A. [Solar simulators for testing of photovoltaic cells for space application]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2015, No. 3(120), P. 73–79 (In Russ.).

10. Gudkova A. V., Gubin S. V., Belokon' V. I. [Thermal stabilization of photovoltaic cells for measuring current-voltage characteristics with a pulsed light source]. *Otkrytye informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tehnologii: sb. nauch. tr.* [Proc. Public information and computer integrated technologies, the Ministry of Educ. and Sc. of Ukraine, Zhukovsky Nat. Aerosp. Univ. "KhAI"]. Kharkov, 2012, Vol. 57, P. 187–196 (In Russ.).

11. BG Series Data. Available at: http://www.pro-design.com.au/product_info.php?product_id=433 (accessed: 10.3.2017).

12. Acme BF-1500NA. Available at: <http://hitonline.ua/products/stroboskopi/acme-bf-1500na.html> (accessed: 10.3.2017).

13. Kolinchuk A. V., Shepetov Ju. A. [The model of the field of lightening of the solar simulator with pulsed source experimental verification]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2016, No. 5(132), P. 35–40 (In Russ.).

14. Kolinchuk A. V., Shepetov Ju. A. [The artificial defocusing application for the light flux alignment in the working area of the solar simulator based on a conical reflector]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2016, No. 1(128), P. 58–63 (In Russ.).

15. Kolinchuk A. V., Shepetov Ju. A. [The gradient toning application for the light flux alignment in the working area of the solar simulator based on a conical reflector]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2016, No. 3(130), P. 30–36 (In Russ.).