

УДК 681.7.06

А. В. КОЛИНЧУК, Ю. А. ШЕПЕТОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ РАСФОКУСИРОВКИ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА В РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОНИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА

Рассмотрена оптическая схема имитатора солнечного излучения на основе конического рефлектора и импульсного протяженного источника излучения. Обоснована проблема возникновения неравномерности освещенности рабочей области имитатора солнечного излучения. Предложен способ выравнивания такой неравномерности путем искусственной расфокусировки отражателя и источника излучения. Построена трехмерная модель имитатора и рассмотрено распределение потока излучения в зависимости от угла искусственной расфокусировки. На основе результатов численного эксперимента сделан вывод о целесообразности применения предложенного способа для выравнивания освещенности рабочей области рассматриваемого имитатора солнечного излучения.

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

Введение

Одним из основных способов энергообеспечения космических аппаратов в мировой космонавтике является применение солнечных батарей для питания бортовой аппаратуры полезной нагрузки и служебных систем космического аппарата (КА). Этот вариант относительно просто реализовать в техническом плане, он достаточно хорошо отработан и надежен при эксплуатации [1-3]. Рыночная стоимость фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) за последние несколько лет значительно снизилась (примерно на 75% с 2009 по 2014 гг.) [4]. Однако это снижение было вызвано в большей степени не снижением себестоимости фотоэлементов за счет прогресса технологий производства и испытаний, а урезанием прибыли компаний-производителей, пытающимся преодолеть конкурентное давление в отрасли. Таким образом, открытым остается вопрос снижения стоимости и повышения эффективности работы солнечных батарей (СБ). Одним из способов, позволяющих увеличить производительность СБ и снизить их стоимость, является использование систем концентрации солнечного излучения [5]. Однако с использованием таких систем повышаются требования к имитаторам солнечного излучения (ИСИ), используемых для испытаний СБ.

Световой поток, излучаемый имитатором, должен быть коллимированным и создавать равномерную освещенность по площади испытуемого образца. Однородность потока является важнейшим качеством имитатора для испытаний солнечных элемен-

тов. С учетом того, что угловой размер Солнца в среднем составляет $32'$, получение одновременно коллимированного и однородного потока является сложной инженерной задачей, решаемой различными способами. Традиционно равномерности освещения элементов добиваются путем смешивания пучков лучей различными способами.

Необходимый угол коллимации ИСИ можно получить при использовании однозеркальной осевой схемы на основе конического зеркала с углом раскрытия 90° и протяженным импульсным источником излучения, совмещенным по осям (рис. 1).

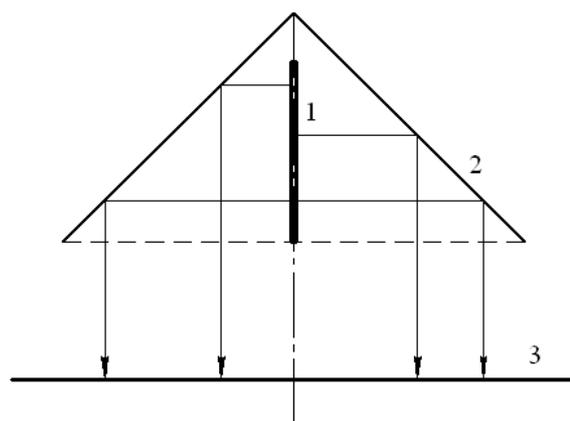


Рис. 1. Оптическая схема имитатора Солнца по однозеркальной осевой схеме на основе конического зеркала с протяженным источником излучения: 1 – источник излучения; 2 – коническое зеркало; 3 – рабочее поле

Такая схема на основе ксеноновых импульсных ламп обеспечивает поворот основного пучка, нормального к излучающей поверхности, в направлении, параллельном оси излучателя, после одного отражения и обеспечивает необходимую параллельность светового потока. Однако при этом возникает принципиальная неравномерность распределения плотности отраженного потока в области рабочего поля (рис. 2).

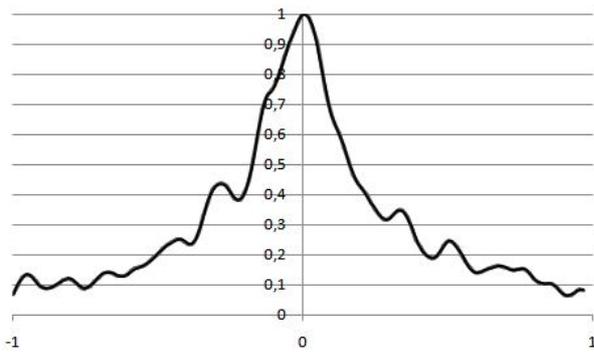


Рис. 2. График зависимости относительной плотности падающего излучения от относительной координаты рабочей области в однозеркальной осевой схеме на основе конического зеркала и протяженным источником излучения

В данной статье предлагается способ выравнивания вышеупомянутой неравномерности светового потока путем искусственной расфокусировки источника излучения и конического отражателя.

Целью данной статьи является обоснование эффективности использования предложенного способа для создания коллимированного и равномерно го потока ИСИ для испытаний ФЭП.

Проблема обеспечения равномерности отраженного светового потока

При использовании в имитаторе Солнца в качестве источника излучения протяженного светового излучателя необходимо решить проблему обеспечения равномерности светового потока в области рабочего поля. В простейшем случае конического зеркала, на осевой линии которого находится излучатель, на рабочее поле попадает единожды отраженный от зеркала световой поток. Принимаем, что поверхность зеркала является идеальным отражателем.

В плоскости, перпендикулярной области рабочего поля, данный излучатель можно принять в качестве линейного источника и рассмотреть задачу в 2D-приближении.

Принимаем, что световой поток, испускаемый лампой, имеет нормальное распределение относительно оси источника излучения и его плотность на выходе из поверхности лампы равна величине E_0 , Вт/м². Отраженный от конического зеркала поток будет иметь плотность E , Вт/м², равную

$$E = E_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2, \quad (1)$$

где r_0 – радиус источника излучения, м;

r – длина перпендикуляра от источника излучения до поверхности отражателя, м (см. рис.3).

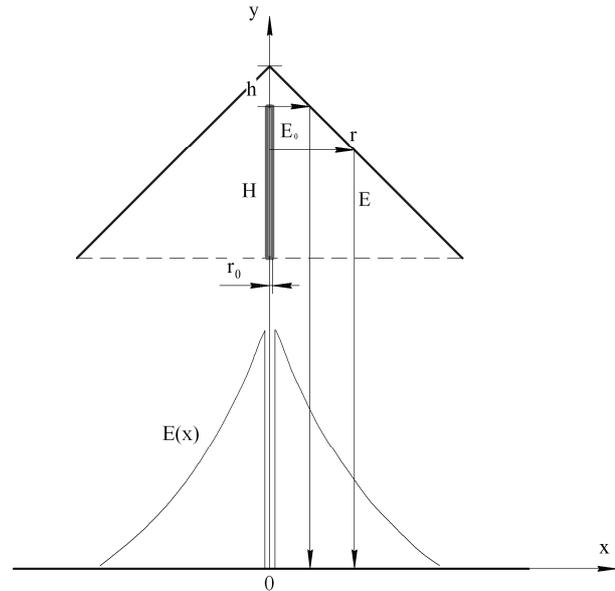


Рис. 3. Расчетная схема распределения потока излучения от протяженного источника, расположенного вдоль оси конического отражателя с графическим представлением распределения плотности светового потока по тестовой площадке

С координатой x величина отраженного потока связана зависимостью

$$E(x) = E_0 \left(\frac{r_0}{x + h}\right)^2, \quad (2)$$

где x – координата луча падающего потока излучения по оси x , м ($r_0 < x < H$);

h – расстояние от конца источника излучения до верхнего края отражателя, м;

H – длина источника излучения, м.

Тогда максимальная плотность падающего излучения будет определяться в точке, наиболее приближенной к вершине конического отражателя, по формуле

$$E_{\max} = E_0 \left(\frac{r_0}{r_0 + h}\right)^2, \quad (3)$$

а минимальная плотность будет соответствовать плотности падающего излучения в точке у основания конического зеркала, и равняться

$$E_{\min} = E_0 \left(\frac{r_0}{H+h} \right)^2. \quad (4)$$

Таким образом, степень равномерности отраженного потока излучения можем определить как

$$\Delta = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}} = \frac{\left(\frac{r_0}{r_0+h} \right)^2 - \left(\frac{r_0}{H+h} \right)^2}{\left(\frac{r_0}{r_0+h} \right)^2} = 1 - \left(\frac{r_0+h}{H+h} \right)^2. \quad (5)$$

Как видим из (5), существует принципиальная неравномерность отраженного от конического рефлектора потока излучения, который зависит от удаленности рабочей области от оси конического рефлектора по оси абсцисс, а также имеется провал в освещенности на рабочей области под источником излучения.

Графически данная неравномерность также представлена на рис. 3.

Моделирование процесса

С помощью среды САD-системы TracePro 6.0, предназначенной для трехмерного моделирования и оптического анализа, построена модель предложенной оптической схемы. Модель включает излучатель 1, который находится на оси конического зеркала 2 с углом раскрытия 90° , и поверхность экспозиции (рис.4).

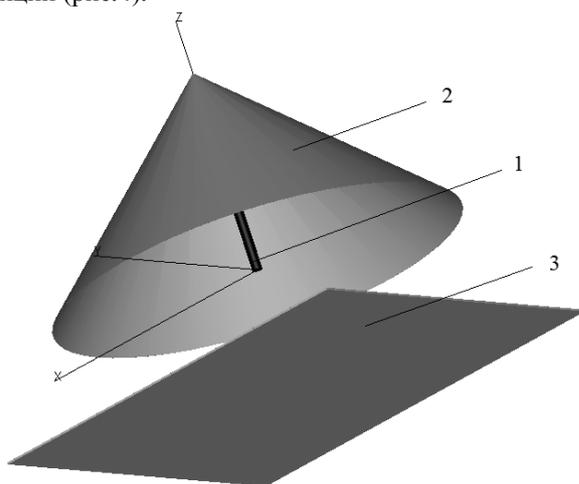


Рис. 4. Модель имитатора солнечного излучения с рефлектором в виде конуса с углом раскрытия 90°

При создании трехмерной модели в качестве прототипа источника излучения взята импульсная ксеноновая лампа ХОР-15 фирмы Philips [6, 7]. Ис-

точнику излучения модели задана мощность, соответствующая мощности лампы ХОР-15, приведенной к постоянному режиму – 1500 Вт; также их габаритные размеры совпадают (длина – 395 мм, диаметр – 12 мм). В качестве параметра источника излучения выбрано угловое распределение лучей по закону Ламберта как наиболее приближенное к реальному распределению. Отражатель выполнен высотой 500 мм; площадь экспозиции находится на расстоянии 300 мм от нижнего края источника излучения.

Для трехмерной модели выполнена трассировка лучей, исходящих от источника излучения заданной мощности, и получены линии равного уровня плотности энергетического потока, а также величины плотности падающего потока энергии имитатора солнечного излучения в каждой точке тестовой панели.

На поверхности экспозиции для дальнейшего исследования были выбраны три варианта рабочей зоны в области сочетания наибольшей интенсивности падающего светового потока и его равномерности:

- 1) размером 100×100 мм;
- 2) размером 100×200 мм;
- 3) размером 200×200 мм.

На рис. 5 представлены области равного уровня плотности энергетического потока для случая с источником излучения, расположенным вдоль оси конического отражателя (угол искусственной расфокусировки равен 0°) с изображением расположения исследуемых рабочих зон.

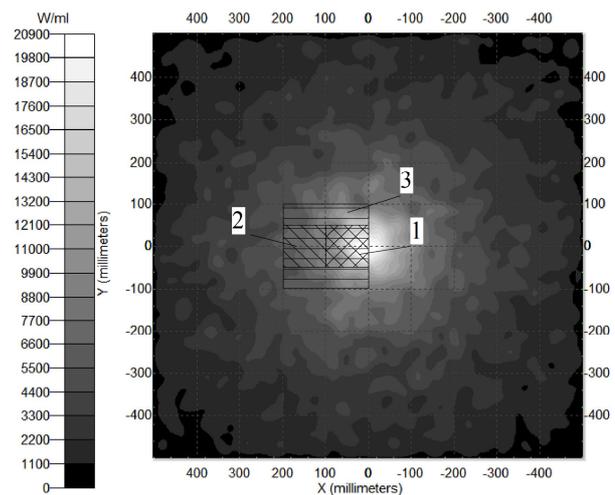


Рис. 5. Области равного уровня плотностей падающего потока энергии без искусственной расфокусировки с изображением расположения рабочих зон

Далее были получены аналогичные данные по плотности падающего потока излучения при искус-

ственной расфокусировке излучателя и отражателя. Для этого конический отражатель отклонялся от оси излучателя на определенный угол относительно оси ординат (от 0° до 15°) (см. рис. 4). Таким образом, поверхность экспозиции оставалась перпендикулярной продольной оси источника излучения, а перераспределение отраженного потока излучения по рабочей области происходило за счет изменения угла наклона рефлектора. Области равного уровня плотности светового потока для углов отклонения 5°, 10°, 12°, 15° представлены на рис. 6, а - г соответственно.

Полученные результаты моделирования нельзя считать достоверными в абсолютном исчислении, поскольку заявленная производителем светоотдача лампы ХОР-15 (2,5 ... 5 лм/Вт) [4] в зависимости от наработанного ресурса имеет значительный разброс значений. Однако для нашего исследования интерес представляют не абсолютные значения величин, а степень равномерности их распределения по исследуемой области.

После получения числовых данных по величине плотности потока падающего излучения в каждой точке поверхности экспозиции из программной среды TracePro, были определены среднее значение, дисперсия и величина неравномерности в трех выбранных вариантах рабочих зон для углов расфокусировки от 0 до 15°. Расчет производился по следующим формулам:

- для определения среднего значения величины:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \tag{6}$$

- для определения величины дисперсии:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}; \tag{7}$$

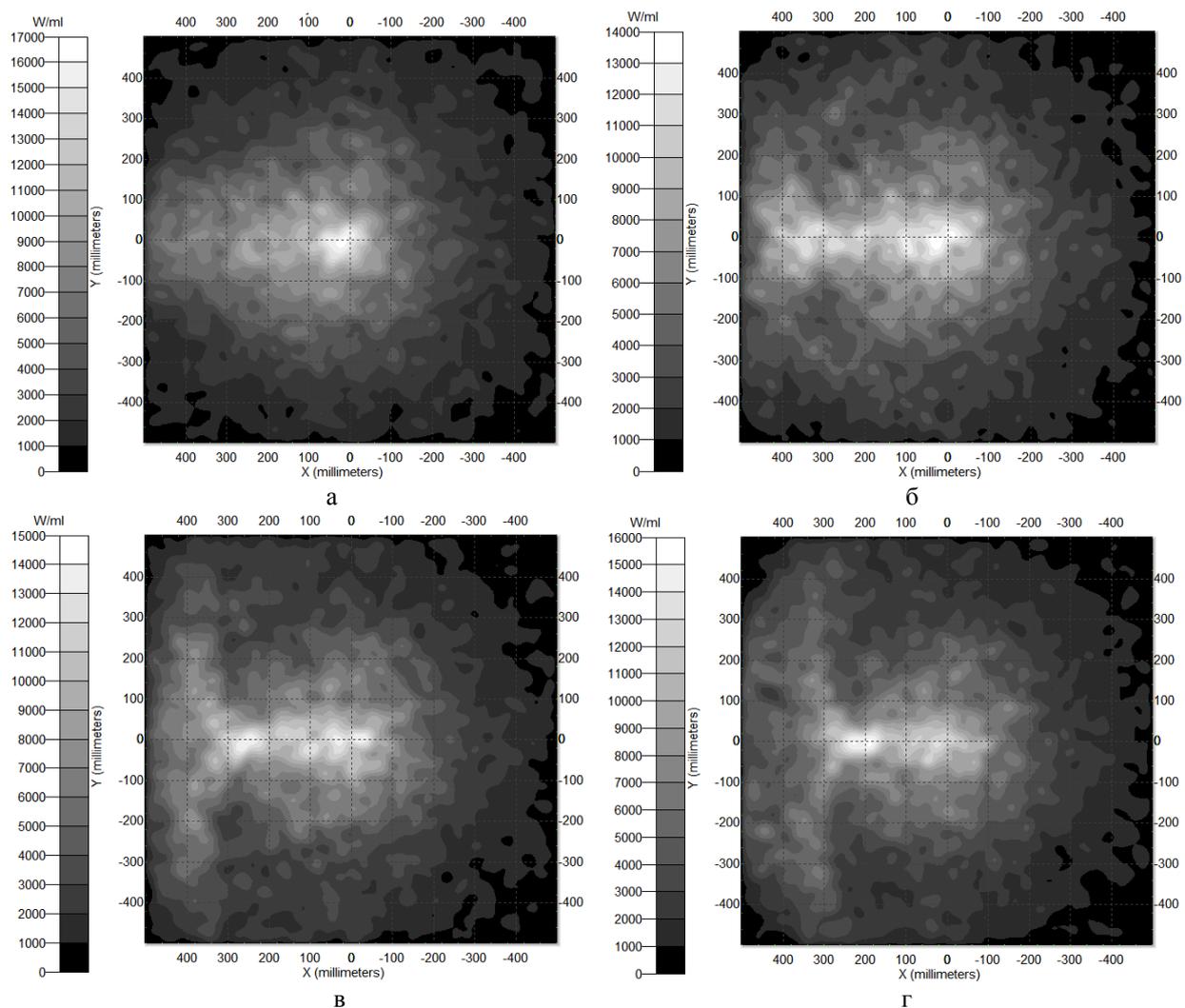


Рис. 6. Области равного уровня плотности энергетического потока для углов расфокусировки: а - 5°; б - 10°; в - 12°; г - 15°

- для определения величины неравномерности:

$$\xi = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{x} \quad (8)$$

Графики зависимости дисперсии и неравномерности потока падающего излучения от угла искусственной расфокусировки для трех вариантов рабочих областей приведены на рис. 7.

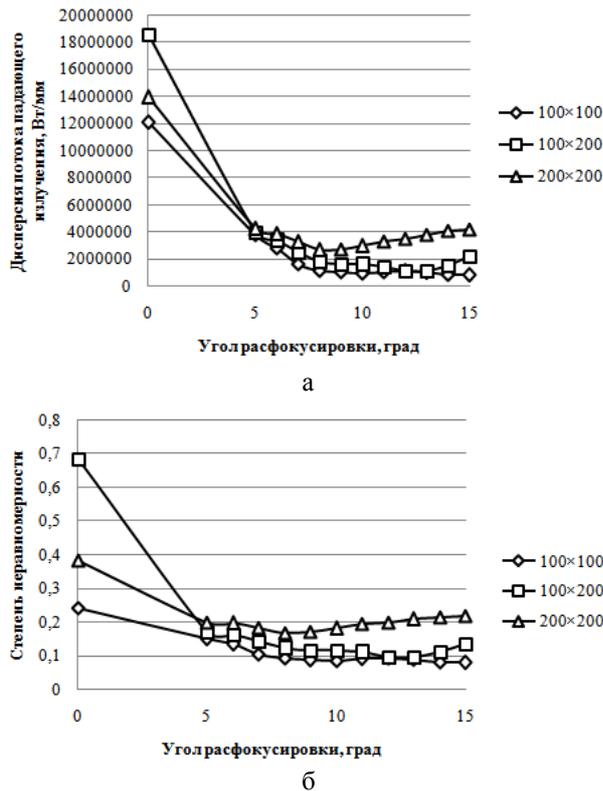


Рис. 7. Графики зависимости дисперсии (а) и неравномерности потока падающего излучения (б) от угла искусственной расфокусировки

На графиках видно, что оптимальный угол расфокусировки (с минимальной неравномерностью падающего потока излучения по площади) отличается для различных вариантов рабочих областей. Также заметим, что для двух вариантов рабочих областей величина неравномерности составляет менее 10%, что в нашем случае является приемлемой величиной.

Таким образом, для варианта рабочей области размером 200×200 мм наименьшая неравномерность достигается при повороте рефлектора на угол 8° и составляет в расчетном случае 16,8%. Без расфокусировки неравномерность для этой области составляет 38,5%. Для рабочей области размером 100×200 мм наименьшая неравномерность составляет 9,7% и достигается при повороте

зеркального отражателя на угол 13°. Без расфокусировки в этой области неравномерность составляет около 68,6%. Для рабочей области размерами 100×100 мм достигается минимальная неравномерность среди трех рассмотренных вариантов, которая составляет 8,5% для угла расфокусировки 10°. Без искусственной расфокусировки в этой области неравномерность составляет 24,2%.

Заключение

Рассмотрена однозеркальная осевая оптическая схема имитатора солнечного излучения с коническим отражателем и протяженным импульсным источником излучения, расположенным вдоль оси отражателя. Показана принципиальная причина возникновения неравномерности падающего потока излучения на рабочей площадке.

Предложен способ выравнивания вышеуказанной неравномерности путем искусственной расфокусировки источника излучения и конического рефлектора. Проведено моделирование предложенной оптической схемы в среде САД-системы TracePro 6.0 и исследовано влияние угла искусственной расфокусировки источника излучения и рефлектора имитатора солнечного излучения на неравномерность освещенности в пределах выбранной рабочей области.

Для трех вариантов рабочих областей разного размера, расположенных в области наибольшей интенсивности падающего излучения, были определены дисперсия и неравномерность интенсивности потока падающего излучения. Определены углы наклона для каждого варианта рабочей области с наименьшей степенью неравномерности распределения потока излучения. Минимальная неравномерность среди рассмотренных вариантов рабочих областей достигнута для площадки 100×100 мм при угле расфокусировки, равным 10° и составляет 8,5%, что почти в 3 раза меньше, чем без использования искусственной расфокусировки.

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

В дальнейшем желательно проведение экспериментального исследования предложенного способа.

Литература

1. Ковальский, В. Я. Имитаторы излучения Солнца и измерение характеристик солнечных ба-

тарей и их элементов: (Обзор) [Текст] / В. Я. Ковальский // Гелиотехника. – 1972. – № 3. – С. 45-51.

2. Ковальский, В. Я. Имитатор внеатмосферного Солнца [Текст] / В. Я. Ковальский, Д. А. Шкловер // Гелиотехника. – 1967. – № 1. – С. 35-42.

3. Колесников, А. В. Конспект лекций по курсу «Испытания космических аппаратов» [Текст] / А. В. Колесников. – М. : МАИ, 2007. – 105 с.

4. Renewable power generation costs in 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publication/s/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf. – 5.11.2015.

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

6. Product Description. XOP Pulsed Xenon [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/322801/xop_pulsed_xenon_322801_ffs_eng.pdf. – 5.11.2015.

7. XOP Pulsed Xenon. XOP 15-OF ICT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://download.p4c.philips.com/l4b/9/928376905102_eu/928376905102_eu_pss_engbe.pdf. – 5.11.2015.

Поступила в редакцию 16.12.2015, рассмотрена на редколлегии 15.02.2016

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО РОЗФОКУСУВАННЯ ДЛЯ ВИРІВНЮВАННЯ СВІТЛОВОГО ПОТОКУ У РОБОЧІЙ ОБЛАСТІ ІМІТАТОРА СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ КОНІЧНОГО РЕФЛЕКТОРА

А. В. Колінчук, Ю. О. Шепетов

Розглянуто оптичну схему імітатора сонячного випромінювання на основі конічного рефлектора і імпульсного протяжного джерела випромінювання. Обґрунтовано проблему виникнення нерівномірності освітленості робочої області імітатора сонячного випромінювання. Запропоновано спосіб вирівнювання такої нерівномірності шляхом штучного розфокусування відбивача і джерела випромінювання. Побудовано тривимірну модель імітатора і розглянуто розподіл потоку випромінювання залежно від кута штучного розфокусування. На основі результатів чисельного експерименту зроблено висновок про доцільність застосування запропонованого способу для вирівнювання освітленості робочої області розглянутого імітатора сонячного випромінювання.

Ключові слова: імітатор сонячного випромінювання, оптична схема, відбивач, джерело випромінювання, неоднорідність потоку випромінювання, штучне розфокусування.

THE ARTIFICIAL DEFOCUSING APPLICATION FOR THE LIGHT FLUX ALIGNMENT IN THE WORKING AREA OF THE SOLAR SIMULATOR BASED ON A CONICAL REFLECTOR

A. V. Kolinchuk, Yu. A. Shepetov

An optical system of solar simulator on the basis of a conical reflector and a pulsed prolonged light source is considered. The problem of occurrence of uneven illumination of the working area of solar simulator is substantiated. The method of smoothing and aligning such irregularity by artificial defocusing of reflector and light source is proposed. Three-dimensional model of the simulator is constructed and the distribution of flux depending on the angle of the artificial defocus is considered. Based on the results of the numerical experiment concluded that the proposed method is appropriate for aligning the illumination in the working area of the solar simulator.

Key words: solar simulator, optical system, reflector, light source, the heterogeneity of the radiation flux, artificial defocus.

Колинчук Алина Владимировна – аспирант каф. космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: lunya18111991@yandex.ru.

Шепетов Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: shepetov9@d4.khai.edu.