

УДК 681.7.06

А. В. КОЛИНЧУК, Ю. А. ШЕПЕТОВ

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО ТОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА В РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОНИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА

Рассмотрена проблема обеспечения равномерности освещенности рабочей области имитатора солнечного излучения. Предложен способ выравнивания такой неравномерности путем градиентного тонирования отражателя либо источника излучения. Построена трехмерная модель имитатора и рассмотрено распределение потока излучения в зависимости от способа нанесения градиентной тонировки. На основе результатов численного эксперимента сделан вывод о возможности применения предложенного способа для выравнивания освещенности рабочей области рассматриваемого имитатора солнечного излучения.

Ключевые слова: имитатор солнечного излучения, отражатель, источник излучения, неравномерность потока излучения, градиентное тонирование.

Введение

Имеется уже немалый опыт разработки систем имитации солнечного излучения (ИСИ) для испытаний солнечных батарей космических аппаратов, который свидетельствует о том, что трудности, встречающиеся на пути создания достаточно совершенных имитаторов Солнца, в принципе преодолимы [1]. Однако открытым остается вопрос снижения стоимости разработки и эксплуатации солнечных имитаторов с сохранением достаточного уровня точности воспроизведения основных параметров излучения: плотности, спектра, степени параллельности.

Равномерность распределения плотности светового потока по площади испытываемого в ИСИ образца является важнейшим качеством имитатора для испытаний солнечных элементов. Малорасходящийся поток излучения можно получить с помощью осесимметричных зеркал различной конфигурации, в фокусах которых находятся достаточно мощные источники излучения [1].

Проблема обеспечения необходимого угла коллимации ИСИ может быть решена путем использования однозеркальной осевой схемы на основе конического зеркала с углом раскрытия 90° и протяженным импульсным источником излучения, совмещенным по осям [2]. Такая схема отвечает основным требованиям к ИСИ и достаточно проста по сравнению со схемами, содержащими сложные системы спрямляющих линз и зеркал [3-7], однако имеет ряд недостатков.

После поворота вследствие отражения от реф-

лектора основного пучка, нормального к излучающей поверхности лампы, на 90° , возникает принципиальная неравномерность распределения плотности отраженного потока в области рабочего поля ИСИ [6].

В данной статье предлагается способ выравнивания вышеупомянутой неравномерности светового потока путем градиентного тонирования поверхности источника излучения либо конического отражателя.

Целью данной статьи является обоснование эффективности использования предложенного способа для обеспечения равномерного потока в поле освещенности ИСИ для испытаний фотоэлектрических преобразователей (ФЭП).

Проблема обеспечения равномерности отраженного светового потока

В имитаторе Солнца с источником излучения в виде протяженного светового излучателя необходимо решить проблему обеспечения равномерности светового потока в области рабочего поля. В простейшем случае рефлектора в виде конического зеркала, на осевой линии которого находится излучатель, на рабочее поле попадает единожды отраженный от зеркала световой поток.

В таком имитаторе существует принципиальная неравномерность в распределении плотности потока излучения, отраженного от конического рефлектора. Данная проблема рассмотрена подробнее в [6].

Предлагаемый способ снижения неравномер-

ности распределения падающего светового потока заключается в следующем. Для рассматриваемого имитатора солнечного излучения выбирается некий базовый уровень плотности светового потока, который обеспечивается по всей необходимой площади рабочей области тестовой панели. Излучение, превышающее выбранный базовый уровень, «отсекается» путем нанесения градиентно-тонируемого покрытия в виде тонкой пленки на лампу-источник излучения либо на конический отражатель. Степень тонирования определяется тем, насколько должен быть уменьшен исходный поток, чтобы на тестовой панели получить равномерно распределенную по площади рабочей области плотность падающего излучения.

От степени тонирования отражающей поверхности рефлектора зависит ее коэффициент отражения: чем выше степень затемнения области, тем ниже коэффициент отражения. Градиентное тонирование лампы-излучателя влияет на коэффициент пропускания или прозрачность излучающей поверхности лампы: с увеличением степени тонирования уменьшается прозрачность и пропускная способность затемненной области.

Таким образом, нанесение градиентно-тонируемого покрытия на рефлектор или излучатель изменяет коэффициенты отражения или пропускания их поверхностей для первого и второго способа соответственно, и позволяет добиться равномерного распределения плотности падающего излучения на приведенном базовом уровне за счет поглощения энергии, превышающей выбранный уровень (рис. 1).

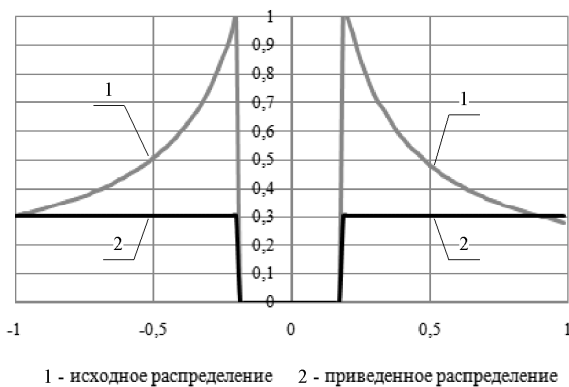


Рис. 1. Сравнительный график теоретического распределения относительной плотности падающего излучения по относительной координате рабочей области до и после градиентного тонирования

Моделирование процесса

Модель рассматриваемой оптической схемы построена в среде САD-системы TracePro 6.0, пред-

назначенной для трехмерного моделирования и оптического анализа. Трехмерная модель схемы состоит из источника излучения 1, который расположен вдоль оси конического отражателя 2 с углом раскрытия 90° , и тестовой панели 3 (рис.2). Подробно такая схема рассмотрена в работе [8].

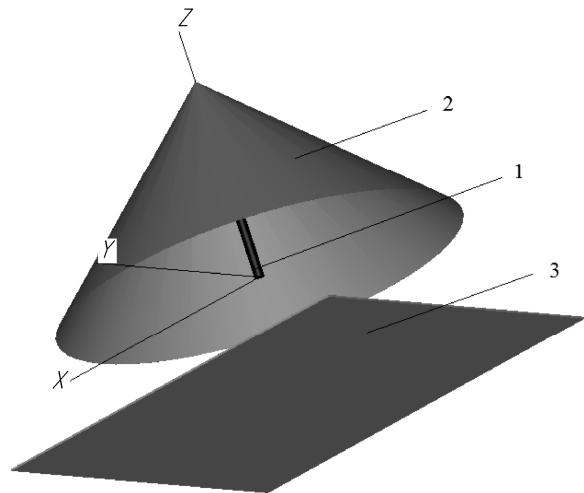


Рис. 2. Трехмерная модель имитатора солнечного излучения с коническим рефлектором (угол раскрытия 90°)

Прототипом источника излучения в трехмерной модели служит импульсная ксеноновая лампа ХОР-15 фирмы Philips. Мощность лампы - источника излучения в модели соответствует мощности лампы ХОР-15, приведенной к постоянному режиму – 1500 Вт; размеры источника излучения в модели и его реального прототипа также совпадают (длина – 395 мм, диаметр – 12 мм). Нижний торец источника излучения расположен в плоскости нижнего основания конусообразного отражателя с высотой и радиусом основания, равными 500 мм. Рабочая область тестовой панели отдалена на расстояние 300 мм от нижнего края источника излучения. Размеры рабочей области составляют 1000×1000 мм.

Установленное распределение лучей от источника излучения в модели определяется нормальным законом для наилучшего проявления эффекта от применения изучаемого метода выравнивания потока.

В среде моделирования для описанной модели выполнена трассировка лучей, исходящих от источника излучения заданной мощности, и получены линии равного уровня плотности энергетического потока, а также величины плотности падающего потока излучения в каждой точке рабочей области.

Считая распределение плотности падающего излучения на поверхность тестовой панели в достаточной степени симметричным относительно оси

источника излучения (рис. 3), была рассмотрена равномерность его распределения по рабочей области в трех выбранных вариантах рабочих зон.

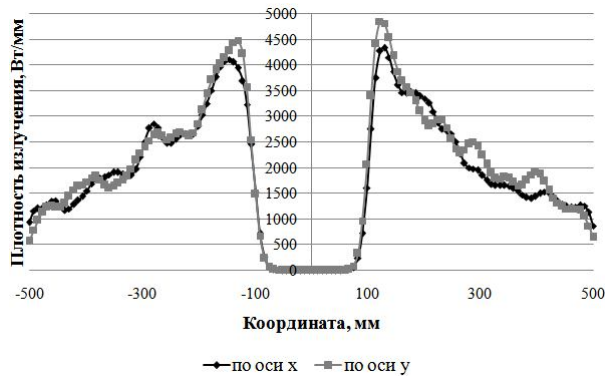


Рис. 3. Графики распределения плотности падающего излучения вдоль осей системы координат в плоскости тестовой панели для базового расчетного случая

Критерием выбора расположения рабочей зоны на рабочей области является сочетание наибольшей интенсивности падающего светового потока и равномерности его распределения на максимальной площади. Соответственно, были выбраны рабочие зоны следующих размеров:

- 1) 800×200 мм (площадью $S_1 = 160\,000$ мм²);
- 2) 400×300 мм (площадью $S_2 = 120\,000$ мм²);
- 3) 400×200 мм (площадью $S_3 = 80\,000$ мм²).

На рис. 4 представлено изображение рабочей поверхности тестовой панели с областями равного уровня плотности потока излучения для базового расчетного случая (без применения исследуемого метода выравнивания потока излучения) с обозначением исследуемых рабочих зон.

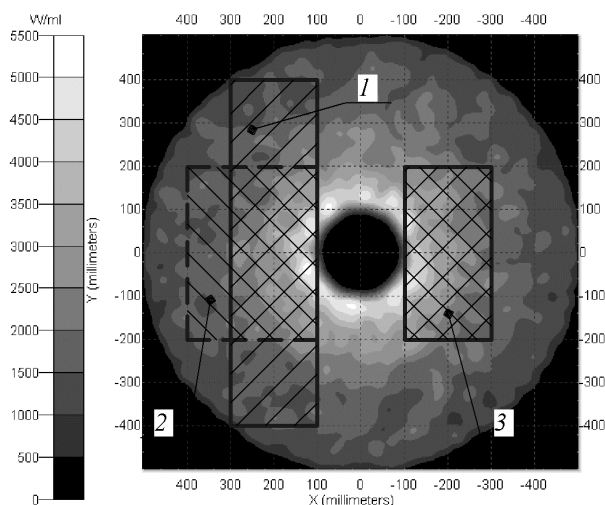


Рис. 4. Области равного уровня плотностей падающего потока энергии для базового расчетного случая с изображением расположения рабочих зон

Следует учитывать, что при использовании рассматриваемой модели имитатора для испытаний фотоэлектрических преобразователей существует возможность одновременного использования нескольких рабочих зон, расположенных симметрично относительно оси источника излучения: двух зон типа 1, двух зон типа 2 или четырех зон типа 3. В таком случае суммарная площадь рабочих зон составит $320\,000$ мм², $240\,000$ мм² и $320\,000$ мм² для совокупностей зон 1,2 и 3 типа соответственно. Такой режим работы имитатора обеспечивает более высокую его эффективность.

Неравномерность потока падающего излучения определена для каждого из трех типов рабочих зон исходя из величин дисперсии и среднего значения в выбранных областях по методике, описанной в [8]. Для базового расчетного случая неравномерность составила 36% для зоны 1, 33% для зоны 2 и 27% для зоны 3.

Величина неравномерности такого порядка является недопустимой для имитатора солнечного излучения выбранного назначения. Поэтому с помощью описанного выше метода градиентного тонирования источника излучения либо отражателя предполагается уменьшить степень неравномерности распределения падающего излучения по рабочей области.

Для того чтобы исключить из расчета случайные погрешности, функция распределения плотности падающего излучения вдоль осей плоскости тестовой панели аппроксимирована степенной функцией, которая наиболее близко соответствует исходным данным, полученным с помощью программы моделирования TracePro 6.0 (рис. 5).

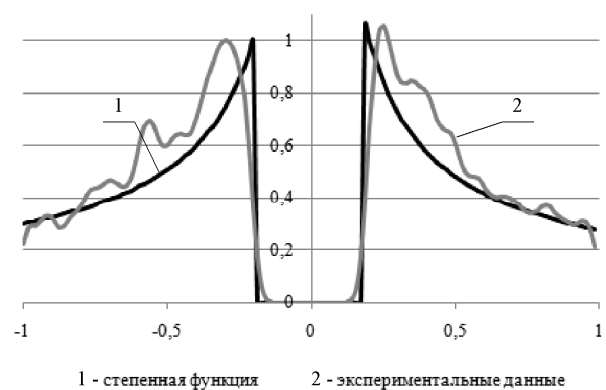


Рис. 5. Сравнительные графики экспериментальных данных и аппроксимирующей степенной функции

Далее вся область светового пятна на рабочей области тестовой панели для удобства расчетов условно разбивается на 20 кольцевых зон, которые

связаны с соответствующими зонами на внутренней поверхности отражателя и излучающей поверхности источника излучения (рис. 6).

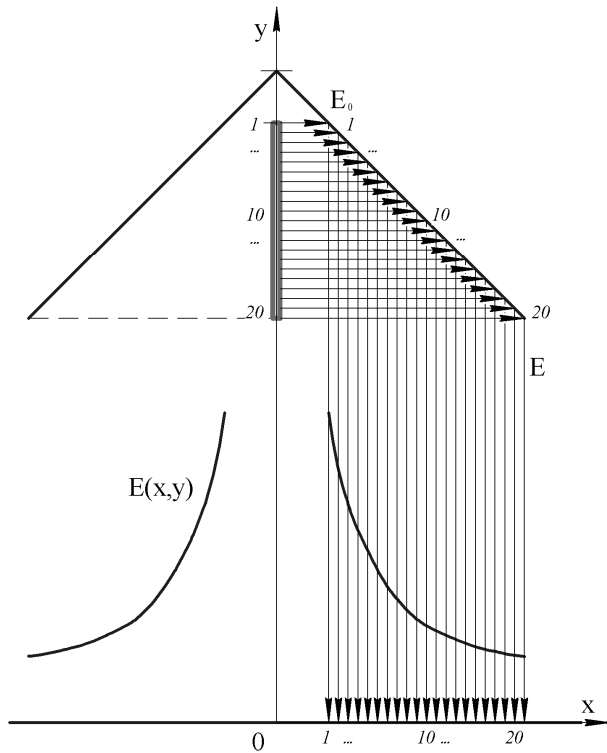


Рис. 6. Схема взаимосвязи кольцевых зон на рабочей области тестовой панели, внутренней поверхности отражателя и внешней поверхности излучателя

Для рассматриваемой модели имитатора приведенный уровень плотности светового потока, который обеспечивается по всей площади рабочей области, в базовом расчетном случае составляет около 1300 Вт/мм. Отсечение части потока, превышающей этот уровень, далее смоделировано в двух вариантах: поглощением избыточного излучения на отражателе и на источнике излучения путем нанесения на них градиентно-окрашенного тонкопленочного покрытия.

Путем обработки полученных числовых данных по плотности падающего излучения для каждой кольцевой зоны в базовом расчетном случае определяется требуемый коэффициент корректировки, величина которого находится в пределах от 0 до 1, соответствующий необходимой степени прозрачности тонирующего покрытия. Для рефлектора полученный коэффициент является коэффициентом отражения, его величина, равная 1 соответствует полному отражению падающего потока, а величина, равная 0 – полному его поглощению. Для излучателя полученный коэффициент является коэффициентом пропускания, его величина, равная 1 соответ-

ствует полному пропусканию падающего потока или абсолютной прозрачности покрытия, а величина, равная 0 – полному поглощению испускаемого излучения или абсолютно непрозрачному покрытию.

Для моделирования процесса трассировки лучей после нанесения тонирующего покрытия в программной среде в исходную модель имитатора солнечного излучения вносятся дополнительные элементы: тонкая градиентно-окрашенная пленка на внутреннюю поверхность отражателя в первом случае и на внешнюю поверхность излучателя во втором. Каждая зона на пленке обладает соответствующим расчетом коэффициентом отражения (для рефлектора) и пропускания (для излучателя), который выражается в степени затемненности пленки.

Величина коэффициента отражения покрытия рефлектора зависит от удаленности соответствующей кольцевой зоны на отражателе от оси имитатора солнечного излучения: чем ближе рассматриваемая зона к оси источника излучения, тем большую часть потока необходимо отсечь, тем меньше коэффициент отражения покрытия рефлектора и более затемнена пленка.

Величина коэффициента пропускания покрытия излучателя также зависит от удаленности соответствующей кольцевой зоны на лампе от рефлектора: чем ближе рассматриваемая зона к поверхности отражателя, тем большую часть потока необходимо отсечь, тем меньше коэффициент пропускания покрытия излучателя и более затемнена пленка.

После внесения соответствующих изменений в исследуемую модель, с помощью среды моделирования были получены данные по плотности падающего потока излучения с применением градиентного тонирования отражателя и излучателя после поглощения избыточной части светового потока.

Данные, полученные в результате моделирования, считать достоверными в абсолютном исчислении не представляется правильным, поскольку заявленная производителем светоотдача лампы ХОР-15 (2,5 ... 5 лм/Вт) [8] в зависимости от наработанного ресурса имеет значительный разброс значений. Однако характер распределения светового потока и степень равномерности этого распределения по площади тестовой панели, которая собственно и представляет интерес для нашего исследования, не вызывает подобных сомнений.

Результаты моделирования в виде поля областей равного уровня плотности энергетического потока на рабочей области после нанесения градиентно-окрашенной пленки на рефлектор и излучатель представлены на рис. 7, а, б.

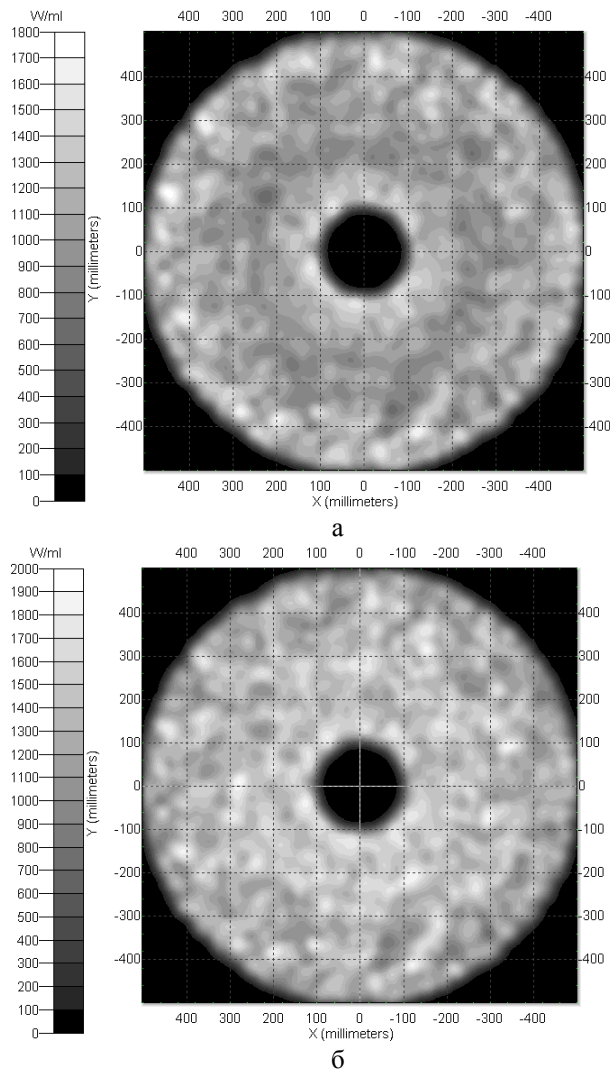


Рис. 7. Области равного уровня плотности падающего потока на тестовой панели после нанесения градиентного тонирования на: а - излучатель; б - отражатель

Результаты распределения лучей в виде графиков зависимостей плотности излучения от координат по осям в плоскости тестовой панели представлены на рис. 8, а, б соответственно.

После получения числовых данных по величине плотности потока падающего излучения в каждой точке поверхности экспозиции из программной среды TracePro, была определена величина неравномерности в трех выбранных вариантах рабочих зон для моделей с градиентным покрытием на отражателе и на излучателе. Расчет производился по методике, описанной в [8]. Сравнительные диаграммы зависимости неравномерности потока падающего излучения на тестовую панель для трех вариантов рабочих областей для двух способов тонирования приведены на рис. 9.

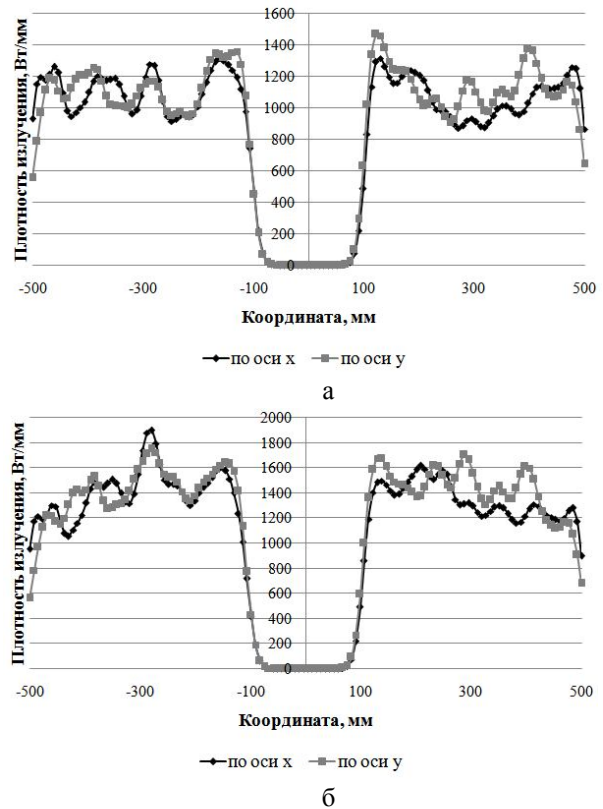


Рис. 8. Графики распределения плотности падающего излучения вдоль осей системы координат в плоскости тестовой панели после нанесения градиентного тонирования на: а - излучатель; б - отражатель

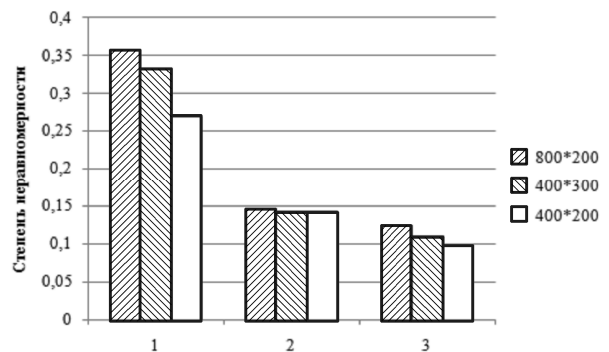


Рис. 9. Диаграммы неравномерности потока падающего излучения трех вариантов рабочих зон в зависимости от способа градиентного тонирования:

1 – базовый расчетный случай; 2 - тонированный излучатель; 3 – тонированный отражатель

На диаграмме видно, что в результате нанесения градиентно-тонированного тонкопленочного покрытия как на источник излучения (лампу), так и на рефлектор (коническое зеркало), значительно снижается степень неравномерности распределения падающего потока по площади рабочих зон всех

трех типов. Так, для рабочей зоны первого типа (800×200 мм) неравномерность снижается в 2,4–2,9 раза, для зоны второго типа (400×300 мм) – в 2,3–3 раза, для зоны третьего типа (400×200 мм) – в 2–2,7 раза. При градиентном тонировании излучателя неравномерность составляет 14–15%, а отражателя – 9–12% для разных вариантов рабочих зон. Заметим, что наименьшая неравномерность (<10%) характерна для зоны третьего типа (400×200 мм) с нанесенным на рефлектор градиентным покрытием, что в нашем случае является приемлемой величиной.

Заключение

Предложен способ выравнивания неравномерности поля освещенности однозеркального имитатора солнечного излучения с протяженным импульсным источником и коническим отражателем путем нанесения тонкопленочного градиентного тонирования на излучатель либо рефлектор. Проведено моделирование предложенной оптической схемы в среде САД-системы TracePro 6.0 и исследовано влияние нанесенного градиентно-тонированного покрытия на излучателе и на отражателе имитатора солнечного излучения на неравномерность плотности освещенности в пределах выбранных рабочих зон.

Для трех вариантов рабочих зон различного размера, расположенных в области наибольшей интенсивности и равномерности падающего излучения, была определена неравномерность распределения плотности потока падающего излучения для двух способов нанесения покрытия. Определены рабочие области с наименьшей степенью неравномерности распределения потока 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.

Таким образом, предложенный способ выравнивания неравномерности падающего светового потока для исследуемой оптической схемы принципиально применим и достаточно эффективен.

Предполагается проведение дальнейшего экспериментального исследования предложенного способа.

Литература

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

2. 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.

3. Крат, С. А. Повышение эффективности имитаторов солнечного излучения [Текст] / С. А. Крат // *Вестник СибГАУ*. – 2011. – № 2. – С. 124–128.

4. Крат, С. А. Тепловакуумная обработка космических аппаратов: развитие новых тенденций [Текст] / С. А. Крат // *Вестник СибГАУ*. – 2010. – № 4. – С. 126–129.

5. Крат, С. А. Теоретические основы способа суммирования световых потоков от отдельных источников излучения для наземной обработки космических аппаратов [Текст] / С. А. Крат // *Вестник СибГАУ*. – 2011. – № 4. – С. 131–134.

6. Domínguez, C. Solar simulator for concentrator photovoltaic systems [Text] / C. Domínguez, I. Antón, G. Sala // *Optics Express*. – 2008. – Т. 16, № 19. – С. 14894–14901.

7. Optical investigation of a sun simulator for concentrator PV applications [Text] / C. Rapp, V. Straub, D. W. van Rooyen, W. Y. Thor, G. Siefer, A. W. Bett // *Optics Express*. – 2015. – Т. 23, № 19. – С. A1270–A1279.

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

References

1. Kolesnykov, A. V. *Konspekt lektsiy po kursu «Ispytaniya kosmicheskikh apparatov»* [Lecture notes of the course "Testing of spacecraft"]. Moscow, Publ. of MAY, 2007. 105 p.

2. Kolinchuk, A. V., Shepetov, Yu. A. Imitatory solnechno izlucheniya dlya ispytaniy fotoelektricheskikh batarey kosmicheskogo naznacheniya [Solar simulators for testing of photovoltaic cells for space applications]. *Aviatsyonno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2015, no. 3(120), pp. 73–79.

3. Krat, S. A. Povysheniye effektivnosti imitatorov solnyechno izlucheniya [Improving the efficiency of solar simulators]. *Vestnyk SybHAU*, 2011, no. 2, pp. 124–128.

4. Krat, S. A. Tyeplovakuumnaya otrabotka kosmicheskikh apparatov: razvitiye novykh tendentsiy [Thermal vacuum testing of spacecrafts: development of new trends]. *Vestnyk SybHAU*, 2010, no. 4, pp. 126–129.

5. Krat, S. A. Teoreticheskiye osnovy sposoba summirovaniya svetovykh potokov ot otdyeln'nykh istochnikov izlucheniya dlya nazemnoy otrabotki kosmicheskikh apparatov [Theoretical basis of the method

of summation of the light fluxes from the individual radiation sources for ground tests spacecrafts]. *Vestnyk SybHAU*, 2011, no. 4, pp. 131-134.

6. Dominguez, C., Antón, I., Sala, G. Solar simulator for concentrator photovoltaic systems. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 19, pp. 14894-14901. doi: 10.1364/OE.16.014894. Available at: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-16-19-14894&id=171902> (accessed 22.05.2016).

7. Rapp, C., Straub, V., van Rooyen, D. W., Thor, W. Y., Siefer, G., Bett, A. W. Optical investigation of a sun simulator for concentrator PV applications. *Optics Express*. -2015, vol. 23, no. 19, pp. A1270-A1279. doi:

10.1364/OE.23.0A1270. Available at: <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-23-19-A1270&origin=search> (accessed 22.05.2016).

8. Kolinchuk, A. V. Ispol'zovanie iskusstvennoy rasfokusirovki dlya vyravnivaniya svetovoho potoka v rabochey oblasti imitatora solnechno izlucheniya na osnove konicheskogo reflektora [Using artificial defocusing for the flux alignment in the working area of the solar simulator based on a conical reflector]. *Aviatsyonno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnolohiya – Aero-space technic and technology*, 2016, no. 1(128), pp. 58-63.

Поступила в редакцию 11.04.2016, рассмотрена на редколлегии 12.05.2016

ВИКОРИСТАННЯ ГРАДІЄНТНОГО ТОНУВАННЯ ДЛЯ ВИРІВНЮВАННЯ СВІТЛОВОГО ПОТОКУ В РОБОЧІЙ ОБЛАСТІ ІМІТАТОРА СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ КОНІЧНОГО РЕФЛЕКТОРА

А. В. Колінчук, Ю. О. Шепетов

Розглянуто проблему забезпечення рівномірності освітленості робочої області імітатора сонячного випромінювання. Запропоновано спосіб вирівнювання такої нерівномірності шляхом градієнтного тонування рефлектора або джерела випромінювання. Побудовано тривимірну модель імітатора і розглянуто розподіл потоку випромінювання в залежності від способу нанесення градієнтного тонування. На основі результатів чисельного експерименту зроблено висновок про можливість застосування запропонованого способу для вирівнювання освітленості робочої області розглянутого імітатора сонячного випромінювання.

Ключові слова: імітатор сонячного випромінювання, рефлектор, джерело випромінювання, нерівномірність потоку випромінювання, градієнтне тонування.

THE GRADIENT TONING 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

The problem of ensuring uniformity of illumination of the working area of the solar simulator is considered. A method of leveling such irregularity by gradient shading of reflector or radiation source is suggested. Three-dimensional model of the simulator is constructed and distribution of radiation flux depending on application of the gradient shading method is considered. Based on the results of 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, reflector, light source, the heterogeneity of the radiation flux, gradient shading.

Колінчук Алина Владимировна – аспирант каф. космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: luna18111991@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.

Kolinchuk Alina Vladimirovna – Postgraduate of Dept. of Space Engineering and Alternative Energy Sources, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: luna18111991@yandex.ru.

Shepetov Yury Alexeyevich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Space Engineering and Alternative Energy Sources, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: shepetov9@d4.khai.edu.