

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Г. В. Двирный¹, А. А. Шевчук^{1,2*}, В. В. Двирный⁴, М. В. Елфимова⁴, Г. Г. Крушенко³

¹АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева», Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

³Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

⁴Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

Российская Федерация, 662971, г. Железногорск, Красноярский край, ул. Северная, д. 1

*E-mail: expert-zh24@yandex.ru

Имитатор солнечного излучения является одним из самых сложных элементов испытательного оборудования, применяемого в ходе наземной отработки космических аппаратов. Большинство современных крупногабаритных имитаторов построено на основе массива газоразрядных ксеноновых ламп воздушного охлаждения по принципу «совмещенных фокусов». Основными недостатками подобных имитаторов являются низкая эффективность и малый ресурс ксеноновых газоразрядных ламп, высокие потери в сложной оптической системе, сложность и неудобство эксплуатации. Предложена схема свободного от указанных недостатков комбинированного имитатора на основе высокоэффективных светодиодов в видимой области спектра и дополнительных традиционных источников, которыми могут быть кварцево-галогенные лампы накаливания в инфракрасной и газоразрядные ртутные лампы среднего давления в ультрафиолетовой областях. Светодиодный источник конструктивно выполнен в виде матриц с распределенными параметрами, расположенных в виде одного или нескольких модулей внутри термовакуумной камеры, непосредственно возле объекта испытаний. Модули снабжены оптической системой, формирующей квазипараллельный световой поток, термоизоляцией и системой охлаждения, выводящей избыточное тепло за пределы камеры. Проведен краткий сравнительный анализ, в ходе которого показаны преимущества светодиодного имитатора по энергоэффективности, однородности и временной стабильности светового потока, надежности, долговечности и безопасности. Предлагаемый имитатор обладает лучшими массогабаритными характеристиками, не требует настройки и юстировки и имеет ряд дополнительных возможностей. Основным недостатком светодиодных источников является несоответствие спектра излучения солнечному. Необходимая спектральная точность может быть достигнута при применении в матрицах большого количества отдельно регулируемых по мощности групп белых и монохромных светодиодов с разными длинами волн и оптической системы, суммирующей потоки групп светодиодов по спектру, углу и площади. На примерах серийно выпускаемых зарубежных светодиодных имитаторов солнечного излучения наземного спектра АМ1,5 прослеживается тенденция перехода на светодиодные источники. Сделан вывод о возможности создания комбинированного имитатора солнечного излучения на основе высокоэффективных светодиодов для наземной отработки космических аппаратов, обладающего улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: космический аппарат, наземная отработка, термовакуумные испытания, имитатор солнечного излучения, световое пятно, источник излучения, светозлучающий диод.

Siberian Journal of Science and Technology. 2018, Vol. 19, No. 2, P. 271–280

ANALYSIS OF LED-BASED SOLAR SIMULATOR DEVELOPMENT CAPABILITY FOR SPACECRAFT GROUND TESTING APPLICATIONS

G. V. Dvirniy², A. A. Shevchuk^{1,2*}, V. V. Dvirniy⁴, M. V. Elfimova⁴, G. G. Krushenko³

¹JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

²Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

³Institute of Computational Modelling SB RAS

50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

⁴ Siberian Fire and Rescue Academy – branch of Saint-Petersburgh University
of State Fire Service of EMERCOM of Russia
1, Severnaya Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
*E-mail: expert-zh24@yandex.ru

A solar simulator is one of the most difficult elements of the test equipment used during ground testing of spacecrafts. The majority of modern large-size simulators are designed on the basis of the block of gas-discharge xenon lamps with air cooling using the principle of the "combined focuses". The main shortcomings of similar simulators are a low efficiency and a small resource of xenon gas-discharge lamps, high losses in the difficult optical system, complexity, and inconvenience of operation. The scheme of the combined simulator free from the specified shortcomings based on the high-effective light-emitting diodes in visible area of a range and additional traditional sources which can be quartz-halogen filament lamps in infrared and gas-discharge medium-pressure mercury-vapour arc lamps ultra-violet areas is offered. The LED source is structurally executed in the form of matrixes with the distributed parameters, located in the form of one or several modules in the thermal vacuum camera directly near the object of testing. Modules are supplied with the optical system forming a quasiparallel light stream, the heat insulation and the cooling system removing excess heat out of camera borders. The short comparative analysis showed advantages of the LED simulator on energy efficiency, uniformity and temporary stability of a light stream, reliability, durability and safety. The offered simulator possesses the best mass-dimensional characteristics, doesn't demand tuning and adjustment and has a number of additional opportunities. The main disadvantage of LED sources is the discrepancy of the solar radiation spectrum. Essential spectral accuracy can be reached at application in matrixes of a large number of separately power-controlled groups of white and monochrome light-emitting diodes with different length of waves and the optical system summarizing flows of groups of light-emitting diodes on a range, a corner and the area. On examples of serially produced foreign LED solar simulators of a ground-level AM1,5 range the tendency of transition to LED sources is traced. It is concluded that the creation of the combined solar simulator on the basis of highly effective light-emitting diodes for ground testing of spacecrafts possessing the improved technical and operational characteristics is possible.

Keywords: spacecraft, ground testing, thermal vacuum testing, solar simulator, luminous spot, emission source, light emitting diode.

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-271–280

Введение. Комплексные термовакуумные испытания являются одним из главных этапов наземной отработки космических аппаратов (КА) и элементов их конструкции в условиях, имитирующих факторы воздействия космического пространства. Поэтому такие испытания проводятся в термовакуумных камерах в условиях, приближенных к условиям реальной эксплуатации КА с применением специальных стендов, систем и испытательного оборудования, в состав которого обязательно входят:

- система вакуумирования;
- имитатор черного холодного космоса;
- имитатор солнечного излучения;
- источники инфракрасного излучения;
- система обеспечения ориентации обрабатываемого КА;
- система регистрации температурных параметров;
- система управления тепловыми имитаторами, электрообогревателями и оборудованием КА [1].

Одним из базовых и наиболее сложных из перечисленных элементов является имитатор солнечного излучения (ИСИ), имитирующий солнечное воздействие на космический аппарат при орбитальном функционировании. Солнечные имитаторы создают поток непрерывного оптического излучения, основные характеристики которого должны с высокой точностью соответствовать аналогичным характеристикам излучения Солнца. В частности, к ИСИ для околоземной орбиты предъявляются следующие требования:

- удельная мощность светового потока равна 1340–1440 Вт/м²;
- неоднородность облучения до ±15 %;
- непараллельность лучей до 4 угловых градусов;

– спектральный диапазон, близкий к диапазону солнечного излучения в области 200–2000 нм [2].

Спектр излучения Солнца за пределами атмосферы AM0 (англ. Air Mass Zero, международный стандарт ASTM International E-490-00), полученный на основании многочисленных данных наземных и космических исследований, близок к спектру излучения абсолютно черного тела температурой 5773 К (рис. 1). Значение световой солнечной постоянной находится в диапазоне 1321–1412 Вт/м².

Новые циклограммы в программах наземной экспериментальной отработки предусматривают изменение солнечной постоянной и угла между направлением на Солнце и осями КА с обеспечением в течение времени различных уровней плотности светового потока – от 400 до 1450 Вт/м². По этой причине актуально новое требование к ИСИ – обеспечение и поддержание переменной во времени освещенности [2].

Одним из перспективных направлений для крупногабаритных ИСИ считается создание модульных систем на основе суммирования нескольких источников точечного излучения – массива охлаждаемых воздухом газоразрядных ксеноновых ламп [3] по принципу «совмещенных фокусов» [4]. На основе такого принципа созданы, например, два отечественных крупногабаритных ИСИ в составе ТБК-120 и ГВУ-600 (рис. 2), действующих в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева».

Анализ недостатков ИСИ на основе газоразрядных ксеноновых ламп. Обладая несомненными преимуществами, такими как высокая мощность и спектральная точность, подобные ИСИ имеют ряд общих характерных недостатков, главным из которых

является низкий КПД. Из электрической энергии, подводимой к источникам светового излучения, лишь около 10 % преобразуется в полезную лучистую энергию, падающую на облучаемую поверхность КА [2]. С одной стороны, это обусловлено низкой эффективностью газоразрядных ксеноновых ламп, с другой – высокими потерями в сложной формирующей оптической системе, состоящей из большого числа элементов.

Так, для оптической системы ИСИ ТБК-120, состоящей из светового щита из семи ламп с эллиптическими рефлекторами, отрицательной линзы, смесителя и параболического зеркала, потери мощности светового потока только в оптической системе составляют значения, представленные в таблице.

Потери мощности светового потока

Элементы светооптической схемы	Мощность на детекторе, Вт
Световой щит	1
Перед отрицательной линзой	0,538
После смесителя	0,422
На параболическом зеркале	0,289
На планшете	0,233

Данные таблицы показывают, что основные потери происходят между световым щитом и отрицательной линзой, а также между смесителем и параболическим зеркалом. Причиной первых потерь является конечная эффективность эллиптического рефлектора, равная приблизительно 60 %.



Рис. 1. Спектральный состав излучения:
1 – AM0 за пределами атмосферы; 2 – AM1,5 у земной поверхности;
3 – черное тело, 5773 К

Fig. 1. Spectral structure of radiation:
1 – AM0 outside the atmosphere; 2 – AM1.5, ground-level;
3 – black body, 5773 K

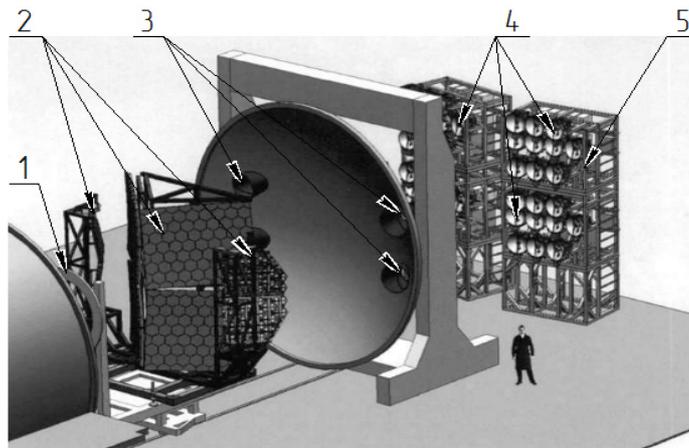


Рис. 2. ИСИ ГВУ-600:
1 – место объекта испытаний; 2 – система зеркал; 3 – оптические вводы и смесители (4 шт);
4 – газоразрядные ксеноновые лампы с рефлекторами (40 шт); 5 – световые щиты (4 шт)

Fig. 2. GUV-600 solar simulator:
1 – the place of a subject to tests; 2 – the system of mirrors; 3 – optical inputs and mixers (4 pc.);
4 – gas-discharge xenon lamps with reflectors (40 pc.); 5 – light boards (4 pc.)

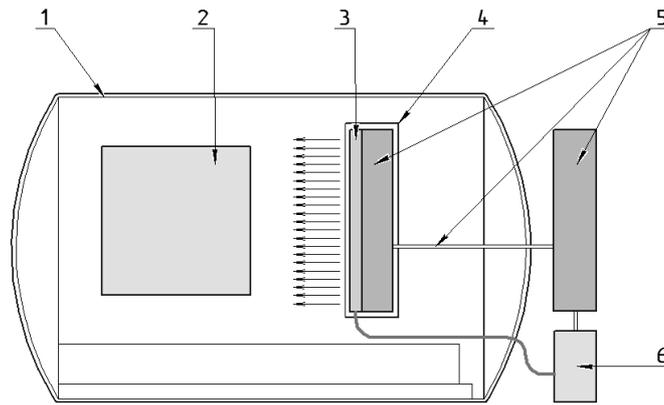


Рис. 3. Компоненка ИСИ внутри термовакuumной камеры:
 1 – термовакuumная камера; 2 – объект испытаний; 3 – источник света на основе светодиодной матрицы; 4 – термоизолирующий корпус; 5 – компоненты системы охлаждения; 6 – вторичные источники питания светодиодной матрицы

Fig. 3. Configuration of the solar simulator in the thermal vacuum camera:
 1 – the thermal vacuum camera; 2 – subject of testing; 3 – a light source based on a LED matrix; 4 – the heat-insulating case; 5 – cooling system components; 6 – secondary power supplies of a LED matrix

Причина вторых – следствие того, что реальный источник, дуга газоразрядной лампы длиной 15–30 мм, не является точечным, расходимость за линзой несколько превышает числовую апертуру смесителя, и часть лучей теряется в смесителе, претерпевая полное внутреннее отражение от боковых граней элементов смесителя [5].

К недостаткам таких систем также можно отнести:

- сложность, трудоемкость настройки и юстировки всех элементов оптической системы, которая проводится заново перед каждым использованием ИСИ с применением специального измерительного планшета для оценки результатов настройки;

- значительные масса, габариты и неудобство монтажа основных компонентов ИСИ и измерительного планшета;

- низкая надежность самых нагруженных звеньев оптической системы – оптического ввода в термовакuumную камеру и смесителя, в которых сфокусированы световые потоки от нескольких (для ГВУ-600 – до десяти) мощных световых источников; высокая плотность светового потока вызывает их усиленный нагрев; ни воздушная, ни жидкостная системы охлаждения не выполняют до конца своей задачи, поскольку нагрев происходит по всей толщине стекла, а охлаждение – по его поверхности; резиновые вакуумные уплотнители оптического ввода для охлаждения тем более недоступны;

- малый срок службы и высокая стоимость газоразрядных ксеноновых ламп, сложность и высокая стоимость импульсных высоковольтных источников питания.

Предлагаемая схема альтернативного светодиодного ИСИ. Очевидно, что свободный от перечисленных недостатков ИСИ будет обладать большей эффективностью и удобством применения. Кроме этого, экономические соображения требуют повышения надежности и снижения стоимости ИСИ при со-

хранении приведенных выше технических характеристик.

Наиболее радикальным решением представляется построение ИСИ без газоразрядных ксеноновых ламп и необходимой для получения квазипараллельного светового потока громоздкой и сложной оптической системы. Это возможно, если изначально формировать квазипараллельный световой поток в принципиально другом источнике света с распределенными параметрами, размеры излучающей поверхности которого будут близки к требуемым размерам светового пятна.

В связи с этим стоит обратить внимание на самые перспективные и динамично развивающиеся в последнее время источники света – высокоэффективные (сверхяркие) светодиоды. Светодиодный источник света с распределенными параметрами можно выполнить в этом случае в виде матрицы из большого количества точечных направленных источников – светодиодов и вторичной оптической системы, суммирующей их излучение в единое световое пятно.

Источник света ИСИ при этом логичнее и выгоднее всего разместить в непосредственной близости к объекту испытаний, т. е. внутри термовакuumной камеры, в виде одного или нескольких компактных модулей с небольшой массой и приемлемыми габаритами (рис. 3).

Целесообразность такого подхода давно известна [6], однако использование в качестве источников света газоразрядных ксеноновых ламп делает его реализацию трудновыполнимой: традиционная оптическая система займет значительный объем внутрикамерного пространства; отвод тепла от ламп воздушного охлаждения за пределы термовакuumной камеры представляет сложную конструктивную задачу; в ходе длительных испытаний невозможна замена отработавших ресурс ламп; высоковольтная проводка большой длины приведет к снижению надежности.

Краткий сравнительный анализ газоразрядных ксеноновых и светодиодных источников света в случае применения их в ИСИ. Проведем сравнительный анализ газоразрядных ксеноновых и светодиодных источников света:

1. Удельная мощность светового потока и энергоэффективность. Эффективность последних поколений сверхярких светодиодов в видимом диапазоне, как минимум, не уступает эффективности газоразрядных ксеноновых ламп. Так, световой поток применяемой в ИСИ ГВУ-600 и ТБК-120 газоразрядной ксеноновой лампы OSRAM XBO 10000W/HS OFR составляет 500000 лм, а потребляемая мощность – 10000 Вт [7], что соответствует эффективности 50 лм/Вт. В то же время для серийно выпускаемых сверхярких светодиодов, например, семейства XLamp XB-D белого спектра с цветовой температурой 5000–8300 К одного из ведущих производителей CREE, эффективность заявлена в пределах 114–139 лм/Вт [8]. Светодиодный источник того же производителя, предназначенный для растениеводства, на основе светодиодов XLamp MHB-B с цветовой температурой 4000 К имеет эффективность 136 лм/Вт, а создаваемый им световой поток достигает 24451 лм [9].

Полагая, что максимальная мощность светового потока ИСИ с учетом потерь в простой оптической системе должна составлять 2000 Вт/м^2 , а интегрированное значение световой мощности для белого спектра однокристалльного одноцветного светодиода со световым потоком 100 лм в течение срока службы достигает 0,3–0,4 Вт [10], можно определить примерное количество светодиодов в матрице простейшего однополосного излучателя площадью 1 м^2 в пределах 5000–6700 шт. Такая плотность легко выполнима при монтаже светодиодов в обычных SMD-корпусах и тем более при использовании многокристалльной технологии (англ. COB – Chip On Board).

Потребляемая мощность такой светодиодной матрицы со световым потоком в видимом диапазоне 500000 лм составит 5000–6700 Вт, тогда как потребляемая мощность газоразрядной ксеноновой лампы OSRAM XBO 10000W/HS OFR с тем же световым потоком – 10000 Вт. С учетом примерно одинаковых КПД импульсных источников питания для газоразрядных ксеноновых ламп и драйверов для светодиодов можно сделать вывод о большей энергоэффективности светодиодных источников. Высокие потери в сложной оптической системе ИСИ на основе газоразрядных ксеноновых ламп усиливают это преимущество.

Выделение большого количества тепла от светодиодных матриц будет влиять на температурный режим внутри термовакуумной камеры. Это предполагает конструктивное исполнение матриц в термоизолированных корпусах с системой охлаждения, переносящей выделяемое тепло за пределы камеры.

2. Однородность светового потока. Квазипараллельный световой поток в ИСИ на основе ксеноновых ламп формируется с помощью сложной оптической системы из большого количества разнесенных в пространстве компонентов от небольшого числа точечных источников (например, 40 ламп при получаемом размере светового пятна 16 м^2 в ИСИ ГВУ-600). Неравномерность получаемого таким способом светово-

го потока зависит от многих факторов, в том числе от точности расчета и изготовления оптической системы, состояния и качества юстировки всех компонентов, квалификации обслуживающего персонала.

В связи с этим можно предположить, что светодиодная матрица с распределенными параметрами, состоящая из большего на несколько порядков количества точечных источников и суммирующей вторичной оптической системы, должна формировать более равномерный квазипараллельный световой поток.

Наиболее простой и рациональной представляется конструкция вторичной оптической системы, при которой каждый светодиод или группа светодиодов снабжены своим оптическим элементом, фокусирующим световой поток в узкоугольную область. Как правило, для формирования таких распределений из точечных источников применяют TIR-элементы – оптические элементы, содержащие поверхности, работающие по принципу полного внутреннего отражения (англ. TIR – Total Internal Reflection) [11; 12]. В отличие от рефлекторов, такие элементы отличаются большей компактностью, эффективностью, полным отсутствием боковой засветки.

Используя метод компьютерного моделирования внутренней поверхности такого элемента, можно рассчитать компактный оптический элемент, формирующий непрерывное узкоугольное световое распределение любой формы, в том числе прямоугольной [13; 14]. Так, эффективность оптического элемента, рассчитанного предложенным в [13] способом (рис. 4, 5), составляет 91,8 %, а отклонение полученного светового распределения от равномерного не превышает 5,2 %.



Рис. 4. Оптический TIR-элемент, формирующий равномерно освещенный квадрат

Fig. 4. The optical TIR element forming evenly lit square

Тогда световые потоки всех оптических элементов светодиодной матрицы, суммируясь на заданном диапазоне расстояний, образуют единое световое пятно с высокой равномерностью.

Следует особо отметить, что оптическая система, выполненная в виде единого массива TIR-элементов, жестко связанных с излучателями, настройки в ходе эксплуатации не потребует.

3. Временная стабильность. Одной из особенностей газоразрядных ксеноновых ламп является необходимость прогрева, а после прогрева – склонность к колебаниям плазмы, которые проявляются в периодических изменениях светового потока. Известно, что светодиоды полностью лишены подобных недостатков.

4. Надежность и долговечность. Гарантированный срок службы ксеноновых газоразрядных ламп до изменения их свойств, как правило, составляет 500–1000 часов против заявляемых, как минимум, 5000–10000 часов для высокоэффективных мощных светодиодов. Срок службы светодиодов может быть значительно продлен при снижении рабочей температуры кристаллов ниже допустимой производителем (как правило, +85 °С).

Маломощные вторичные источники питания, применяемые для светодиодов, по простоте и надежности превосходят мощные импульсные источники питания газоразрядных ксеноновых ламп.

5. Безопасность. В отличие от низкого напряжения питания светодиодов, напряжение на электродах ксеноновых ламп достигает при запуске 35–60 кВ, представляя повышенную опасность для обслуживающего персонала. Озон, образующийся при работе, по токсичности относится к первому классу опасности. Высокое давление газа в колбе от 35 атм. и выше

требует особых мер безопасности при обращении с лампами.

6. Спектральная точность. Главным преимуществом газоразрядных ксеноновых ламп считается близость спектра их излучения к солнечному спектру (рис. 6).

Спектр белых светодиодов различных цветовых температур (рис. 6, 7), наоборот, не обеспечивает требуемой спектральной точности и требует дополнительной коррекции как минимум в ультрафиолетовой (менее 400 нм), голубой (450–470 нм) и красной (620–780 нм) областях.

Для повышения спектральной точности комбинируют световой поток нескольких групп как белых, так и корректирующих монохромных светодиодов. Точность дополнительно повышается при раздельном регулировании мощности каждой группы, а также с увеличением общего числа групп, что видно из сравнительных результатов имитации спектра АМ1,5 (рис. 8) в работе [15].

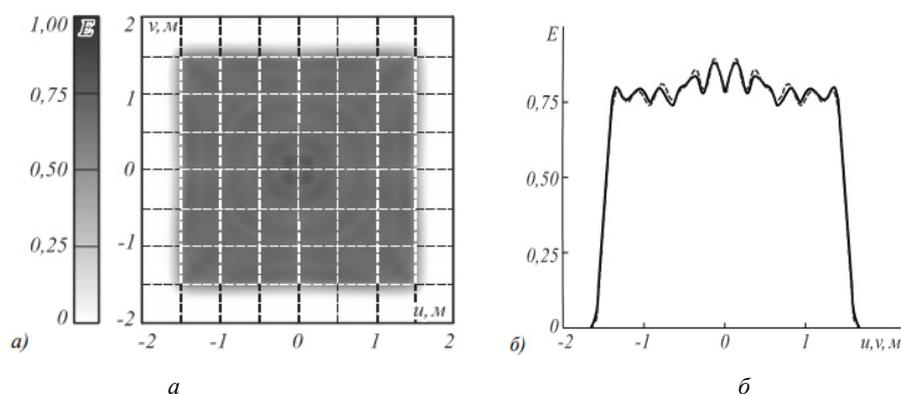


Рис. 5. Распределение освещенности, формируемое оптическим элементом, представленным на рис. 4: *a* – полутоновое распределение освещенности; *b* – профили распределения освещенности

Fig. 5. The distribution of illumination formed by the optical element presented in fig. 4: *a* – gray-scale distribution of illumination; *b* – profiles of distribution of illumination

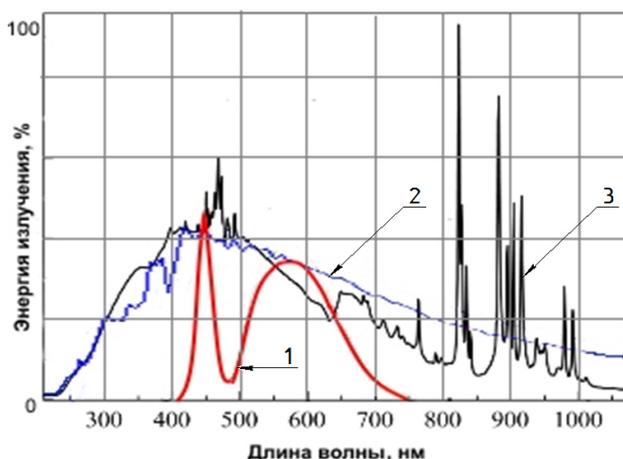


Рис. 6. Зависимость энергии излучения от длины волны: *1* – светодиод белого спектра, 3500–5000 К; *2* – АМ0; *3* – короткодуговая ксеноновая лампа

Fig. 6. Dependence of energy of radiation from wavelength: *1* – a light-emitting diode of a white range, 3500–5000 K; *2* – АМ0; *3* – a short-arc xenon lamp

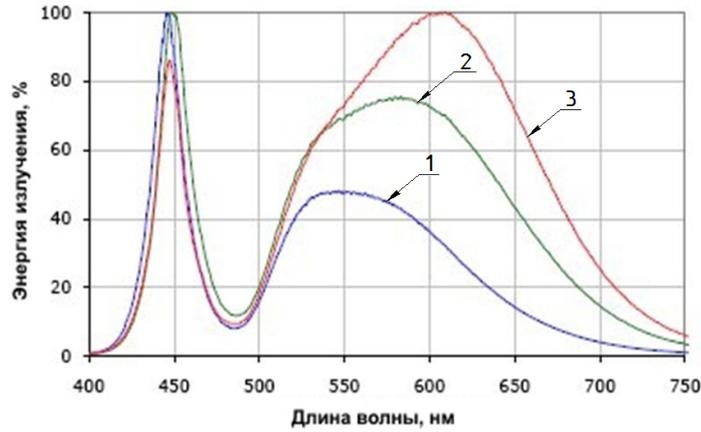


Рис. 7. Зависимость энергии излучения от длины волны белых светодиодов: 1 – 5000–8300 К; 2 – 3500–5000 К; 3 – 2600–3500 К

Fig. 7. Dependence of energy of radiation from the wavelength of white light-emitting diodes: 1 – 5000–8300 K; 2 – 3500–5000 K; 3 – 2600–3500 K

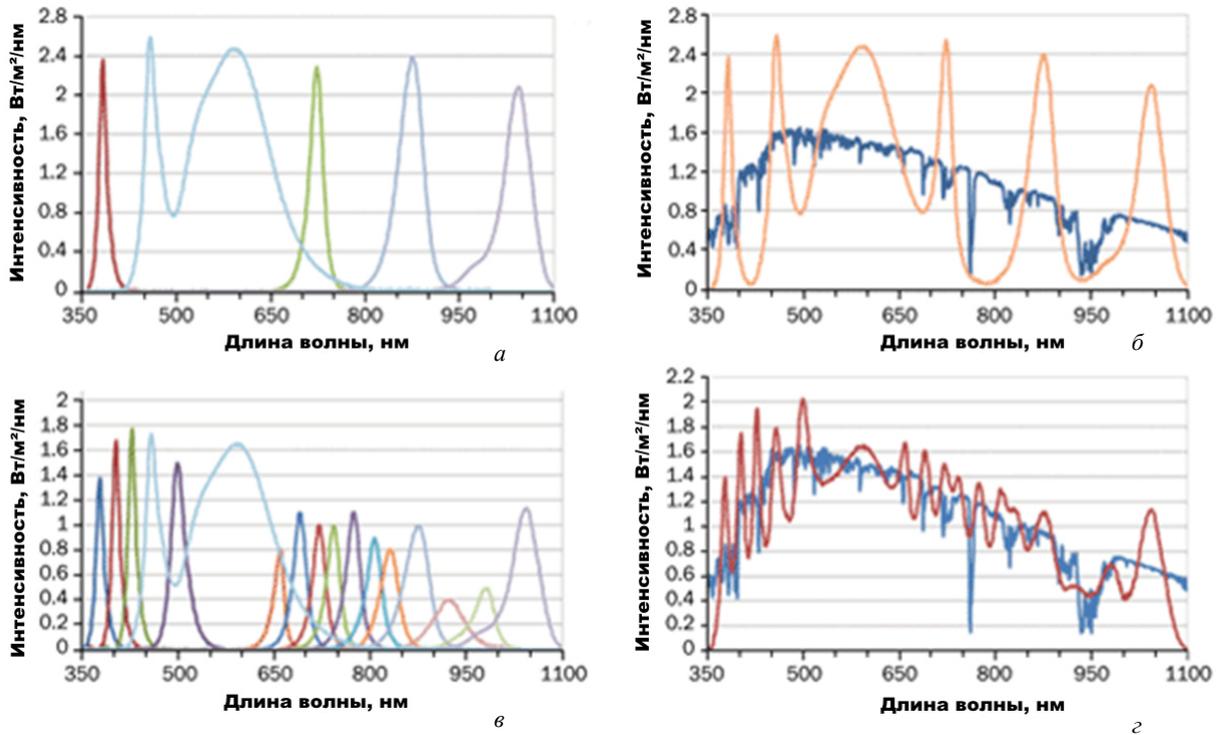


Рис. 8. Спектральное распределение удельной мощности и соответствие суммарного излучения AM1,5: а, б – для пяти групп светодиодов; в, г – для шестнадцати групп

Fig. 8. Spectral distribution of specific power and compliance of total radiation of AM1.5: а, б – for five groups of light-emitting diodes; в, г – for sixteen groups

Главным препятствием в реализации указанного способа для условий АМ0 может стать высокая стоимость, низкая эффективность и узкая полоса излучения светодиодов ультрафиолетового диапазона. В связи с этим оправданно применение вместо них традиционных ультрафиолетовых источников, например, ртутных ламп среднего давления с высоким КПД.

Несоответствие спектра ИСИ в инфракрасной и частично красной области (более 680 нм) при термовакуумных испытаниях, как правило, эффективно компенсируется имитаторами тепловых потоков (ИТП), расположенными в непосредственной близости к объекту испытаний. Так, часто используемые в ИТП кварцево-галогенные лампы КГТ 220–1000 с цветовой температурой 1800–2800 К и максимумом

излучения в области 1100 нм преобразуют в инфракрасное излучение до 85 % потребляемой мощности.

Возможность комбинирования в ИСИ светодиодных источников и галогенных ламп накаливания также предложена в ряде работ, например, в [16].

7. Дополнительные возможности. В отличие от ксеноновых ламп, выходная мощность светодиодов при помощи широтно-импульсной модуляции может плавно изменяться в пределах от 0 до 100 %. Таким образом, можно в максимально широких пределах управлять мощностью светового потока, а регулируя отдельно мощность каждой группы излучателей многополосного источника, настраивать спектр ИСИ. Используя несколько компактных световых модулей, расположенных в разных плоскостях относительно объекта испытаний, плавным изменением светового потока отдельных групп излучателей по принципу «бегущей волны» можно имитировать поворот объекта относительно Солнца.

Таким образом, краткий сравнительный анализ источников света на основе газоразрядных ксеноновых

ламп и высокоэффективных светодиодов в случае применения их в ИСИ предполагает преимущество светодиодных источников по большинству основных показателей.

Примеры серийно выпускаемых образцов ИСИ наземного спектра. Стоит отметить, что уже существуют серийно выпускаемые образцы зарубежных светодиодных ИСИ, предназначенных для имитации излучения Солнца у земной поверхности по условиям AM1,5. В частности, ИСИ Oriel VeraSol [17] производителя Newport Corporation (рис. 9) на основе многополосного излучателя обеспечивает удельную световую мощность до 1000 Вт/м² при размере светового пятна 51 × 51 мм с возможностью настройки спектра по шести полосам (рис. 10).

Другой светодиодный ИСИ Ecosun Plus [18] производителя Esoprogetti (рис. 11) предназначен для испытания солнечных батарей в импульсном режиме и обеспечивает выходную мощность до 1200 Вт/м², неоднородность светового потока не более 1 % и размер светового пятна 2 × 1,2 м.



Рис. 9. ИСИ спектра AM1,5 Oriel VeraSol

Fig. 9. Oriel VeraSol AM1.5 solar simulator

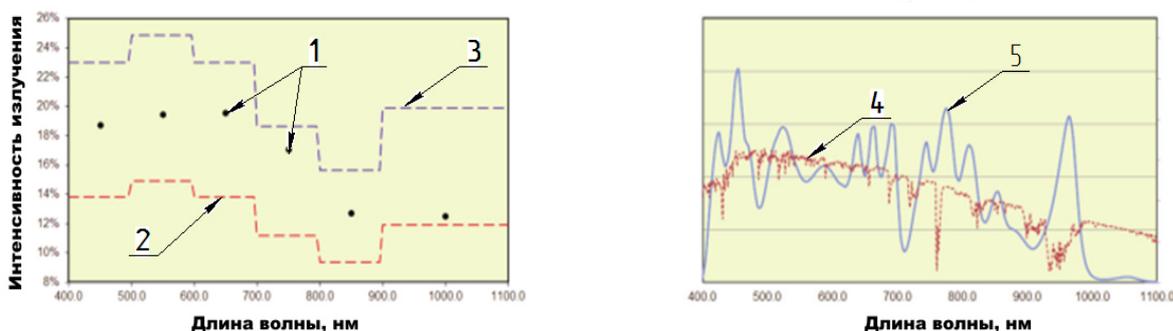


Рис. 10. Спектральное распределение:
1, 5 – светодиодный источник Oriel VeraSol; 2 – минимальный уровень;
3 – максимальный уровень; 4 – AM1,5

Fig. 10. Spectral distribution:
1, 5 – a LED source of Oriel VeraSol; 2 – the minimum level; 3 – the maximum level;
4 – AM1.5



Рис. 11. ИСИ спектра AM1,5 Ecosun Plus

Fig. 11. Ecosun Plus AM1.5 solar simulator

Заключение. При использовании последних разработок в области высокоэффективных светодиодных источников представляется возможным создание комбинированного имитатора солнечного излучения спектра AM0 для наземной обработки космических аппаратов с улучшенными эксплуатационными и техническими характеристиками на основе светодиодных матриц в видимой области и традиционных излучателей в инфракрасной и ультрафиолетовой области с расположением комбинированного источника света в непосредственной близости к объекту испытаний внутри термовакуумной камеры.

Наиболее сложной задачей при создании такого имитатора может стать разработка оптической системы, суммирующей потоки отдельных светодиодов матрицы по спектру, углу и площади, а также высокопроизводительной системы охлаждения, выводящей избыточное тепло термоизолированного светодиодного источника излучения за пределы камеры.

Библиографические ссылки

1. Крат С. А., Христич В. В. Тепловакуумная обработка КА: развитие современных тенденций // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4 (30). С. 126–129.
2. Подходы к созданию комплексных систем для обработки и испытания космических аппаратов / С. В. Кравченко [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1 (13). С. 149–175.
3. Крупногабаритные имитаторы солнечного излучения для тепловакуумных испытаний негерметичных космических аппаратов / С. А. Крат [и др.] // Фотоника. 2014. № 2 (44). С. 12–19.
4. Крат С. А. Теоретические основы способа суммирования световых потоков от отдельных источников излучения для наземной обработки космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2011. № 4 (37). С. 131–134.
5. Моделирование и параметрическая оптимизация светооптической схемы имитатора солнца для тепловой обработки негерметичных космических аппаратов / С. А. Крат [и др.] // Вестник СибГАУ. 2011. № 4 (37). С. 134–139.
6. Разработка компактных источников излучения солнечного спектра / Р. О. Асланян [и др.] // Решетневские чтения : сб. науч. тр. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. 2016. С. 436–437.
7. XBO Lamps For Digital Cinema Projection // OSRAM. Профессиональные и технические решения [Электронный ресурс]. URL: <https://www.osram.ru/pia/applications/cinema/xbo-lamps/index.jsp> (дата обращения: 25.01.2018).
8. CREE XLamp XHP70.2 LEDs Product Family Data Sheet [Электронный ресурс] // CREE. URL: <http://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-XHP702.pdf> (дата обращения: 25.01.2018).
9. Greenhouse Full Spectrum High Bay Reference Design [Электронный ресурс] // CREE. URL: <http://www.cree.com/led-components/media/documents/24KlmHorticultureReferenceDesign.pdf> (дата обращения: 25.01.2018).
10. Никифоров С. В. Исследования параметров светодиодов CREE XLamp XP-E/XP-G/XM-L [Электронный ресурс] // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 2. URL: http://www.led-e.ru/articles/svetodioid/2011_2_12.php (дата обращения: 25.01.2018).
11. Talpur T., Herkommer A. TIR collimator designs based on point source and extended source methods // Proceedings of SPIE. 2015. Vol. 9629. P. 962906–962916. DOI: 10.1117/12.2190935.
12. 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. DOI: 10.1364/JOSAA.29.001758.
13. Метод расчета оптических элементов с поверхностью свободной формы, работающей по принципу полного внутреннего отражения / К. В. Андреева [и др.] // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 4. С. 467–474.
14. Белоусов А. А., Моисеев М. А. Расчет вторичной оптики светодиодного прожектора для формирования заданного распределения освещенности // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. № 4 (24). С. 148–158.

15. Reynolds K. LED-Based Sun-Simulator Design: Technical and Commercial Considerations. *Photonics Spectra*. 2015. P. 54.

16. Базилевский А. Б., Карпенко А. В. Имитатор солнечного излучения на базе комбинированных непрерывных источников света // *Материалы науч.-техн. конф. ОАО «ИСС им. акад. М. Ф. Решетнева» Железнодорожск*. 2011. С. 160–162.

17. VeraSol-2 LED Class AAA Solar Simulator // Newport [Электронный ресурс]. URL: <https://www.newport.com/f/class-aaa-led-solar-simulators> (дата обращения: 25.01.2018).

18. Sun Simulator For Solar Panel Testing In LED Class A+A+A+ [Электронный ресурс] // ECOPROGETTI. URL: <https://ecoprogetti.com/sun-simulator-for-solar-panel-testing-in-led-class-aaa/> (дата обращения: 25.01.2018).

References

1. Krat S. A., Hristich V. V. xHeat-vacuum development of spacecraft: development of modern trends. *Vestnik SibGAU*. 2010, Iss. 4 (30), P. 126–129 (In Russ.).

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

3. Krat S. A., Hristich V. V., Shlyahtin M. S., Filatov A. A. [Large-size simulators of solar radiation for heat-vacuum testing of unsealed space vehicles]. *Fotonika*. 2014, No. 2 (44), P. 12–19 (In Russ.).

4. Krat S. A. [Theoretical foundations of the method of summation of light fluxes from individual radiation sources for ground-based development of space vehicles]. *Vestnik SibGAU*. 2011, No. 4 (37), P. 131–134 (In Russ.).

5. Krat S. A., Filatov A. A., Dvirnyy V. V., Hristich V. V., Sharov A. K. [Modeling and parametric optimization of the light-optical scheme of the solar simulator for thermal testing of unsealed space vehicles]. *Vestnik SibGAU*. 2011, No. 4 (37), P. 134–139 (In Russ.).

6. Aslanyan P. O., Marchenko I. A., Anisimov D. I., Pantelev V. I. [Development of compact sources of radiation from the solar spectrum]. *Reshetnyovskie chteniya*. 2016, P. 436–437.

7. XBO Lamps For Digital Cinema Projection. OSRAM. Professional and technical solutions. Available at: <https://www.osram.ru/pia/applications/cinema/xbo-lamps/index.jsp> (accessed 25.01.2018).

8. CREE XLamp XHP70.2 LEDs product family data sheet. CREE [Electronic resource]. URL:

<http://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-XHP702.pdf> (accessed 25.01.2018).

9. Greenhouse Full Spectrum High Bay Reference Design. CREE. Available at: <http://www.cree.com/led-components/media/documents/24KlmHorticultureReferenceDesign.pdf> (accessed 25.01.2018).

10. Nikiforov S. V. Issledovaniya parametrov svetodiodov CREE XLamp XP-E/XP-G/XM-L. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*. 2011. Available at: http://www.led-e.ru/articles/svetodiod/2011_2_12.php (accessed 25.01.2018).

11. Talpur T. TIR collimator designs based on point source and extended source methods. T. Talpur, A. Herkommer. *Proceedings of SPIE*. 2015, Vol. 9629, P. 962906–962916. DOI: 10.1117/12.2190935.

12. 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. DOI: 10.1364/JOSAA.29.001758.

13. Andreeva K. V., Moiseev M. A., Kravchenko S. V., Doskolovich L. L. [Calculation method for optical elements with a free-form surface operating on the principle of total internal reflection]. *Kompyuternaya tekhnika*. 2016, Vol. 40, No. 4, P. 467–474 (In Russ.).

14. Belousov A. A., Moiseev M. A. [Calculation of the secondary optics of the LED spotlight for the formation of a given light distribution]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2010, No. 4 (24), P. 148–158 (In Russ.).

15. Reynolds K. LED-Based Sun-Simulator Design: Technical and Commercial Considerations. *Photonics Spectra*, March 2015, P. 54.

16. Bazilevskiy A. B., Karpenko A. B. [The simulator of solar radiation on the basis of combined continuous light sources]. *Material nauchn.-tehn. konf. OAO "ISS im. akad. M. F. Reshetneva"* [Proceedings of Scientific and Techn. Conf. JSC "Reshetnev-ISS"]. Zheleznogorsk, 2011, P. 160–162 (In Russ.).

17. VeraSol-2 LED Class AAA Solar Simulator. Newport [Electronic resource]. Available at: <https://www.newport.com/f/class-aaa-led-solar-simulators> (accessed 25.01.2018).

18. Sun Simulator For Solar Panel Testing In LED Class A+A+A+. ECOPROGETTI. Available at: <https://ecoprogetti.com/sun-simulator-for-solar-panel-testing-in-led-class-aaa> (accessed 25.01.2018).

© Двирный Г. В., Шевчук А. А., Двирный В. В., Елфимова М. В., Крушенко Г. Г., 2018