

## ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРСПЕКТИВНОГО СВЕТОДИОДНОГО ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Шевчук<sup>1, 2</sup> ✉, Г. В. Двирный<sup>3</sup>, Г. Г. Крушенко<sup>4</sup>,  
В. В. Двирный<sup>1, 2</sup>, М. В. Елфимова<sup>5</sup>

<sup>1</sup>АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,  
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнёва,  
г. Красноярск, Российская Федерация

<sup>4</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН,  
г. Красноярск, Российская Федерация

<sup>5</sup>Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

*Переход к производству космических аппаратов нового поколения требует значительного совершенствования методов и средств наземной экспериментальной отработки, повышения точности испытательного оборудования. Одним из базовых и наиболее сложных элементов испытательного оборудования, применяемого при комплексных термовакуумных испытаниях космических аппаратов, является имитатор солнечного излучения. В настоящее время перспективным направлением считается построение имитаторов солнечного излучения на основе высокоэффективных светодиодов, имеющих значительные преимущества перед традиционными источниками. В числе основных задач при создании светодиодного имитатора солнечного излучения, адаптированного для наземной отработки космических аппаратов, находится разработка высокоэффективной и, в то же время, компактной оптической системы, суммирующей с минимальными потерями излучение множества отдельных светодиодов светодиодной матрицы по спектру, углу и площади в однородное световое поле. В статье проанализированы результаты математического моделирования светового источника светодиодного имитатора солнечного излучения на примере нескольких моделей с различным числом светодиодов, как без оптических элементов, так и с различными первичными оптическими элементами. Из результатов следует, что светодиодный имитатор солнечного излучения обязательно должен иметь, как минимум, первичную оптическую систему. Определено влияние количества, типа и размера первичных оптических элементов в матрице на характеристики светового потока. Совместное применение первичной и вторичной оптических систем приводит к дальнейшему повышению световых характеристик светодиодного имитатора солнечного излучения, но ценой некоторого снижения общей эффективности. В целом характеристики смоделированного светового источника соответствуют или вплотную приближаются к требуемым, что говорит о принципиальной возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной отработки космических аппаратов.*

*Ключевые слова:* космический аппарат, наземная отработка, термовакуумные испытания, имитатор солнечного излучения, оптическая система, светоизлучающий диод.

### Введение

Развитие многих отраслей народного хозяйства и ряда направлений научных исследований се-

годня невозможно без использования искусственных спутников Земли. Одним из наиболее успешных и динамично развивающихся инновационных направлений сегодня считается, в частности, космический мониторинг. Помимо традиционной военной и разведывательной сферы, приоритетным направлением космического мониторинга является ликвидация последствий чрезвычайных ситу-

✉ expert-zh24@yandex.ru

© Шевчук А. А., Двирный Г. В., Крушенко Г. Г.,  
Двирный В. В., Елфимова М. В., 2019

аций. Так, Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС) России для обработки космической информации задействует пять наземных комплексов. В 2018 году система космического мониторинга МЧС задействовала комплексы более чем в 130 чрезвычайных ситуациях и обработала более двух тысяч снимков, благодаря чему оперативно отреагировала более чем на 115 тысячах термических аномалиях. Сейчас космическая группировка МЧС России насчитывает двенадцать спутников, из которых восемь отечественного производства.

Надежность как космического аппарата в целом, так и его отдельных систем подтверждается на этапе проведения ключевых наземных испытаний – наземной экспериментальной отработки. Вероятность безотказной работы космического аппарата (КА) напрямую зависит от качества экспериментальной отработки, а переход к производству негерметичных КА нового поколения требует дальнейшего усовершенствования её методов и средств.

Одним из базовых и наиболее сложных элементов испытательного оборудования, применяемого при комплексных термовакuumных испытаниях КА, является имитатор солнечного излучения (ИСИ), с необходимой точностью имитирующий солнечное воздействие на КА при орбитальном функционировании. Так, существующие в настоящее время отечественные ИСИ отвечают следую-

щим основным требованиям:

- удельная мощность светового потока 1340–1440 Вт/м<sup>2</sup>;
- неравномерность энергетической освещенности до ±10 %;
- спектральный диапазон, близкий к диапазону солнечного излучения в области 200–2000 нм, с несоответствием не более 10 % от номинальных значений.

Излучение Солнца в условиях открытого космоса исключительно прямое, в отличие от земных условий, где даже в условиях ясного неба на долю рассеянного излучения приходится 10–15 %. Поэтому непараллельность светового потока существующих отечественных ИСИ для околоземной орбиты нормируется в пределах 4 угловых градусов [1].

Краткие характеристики трёх отечественных и двух зарубежных действующих ИСИ для термовакuumных испытаний КА приведены в табл. 1 [2].

Данные табл. 1 говорят о необходимости совершенствования характеристик вновь создаваемых отечественных ИСИ. Высокий уровень технического исполнения отечественных КА и введение новых стандартов также предполагают новые требования к точности испытательного оборудования. В частности, действующий с 2017 года ГОСТ Р МЭК 60904-9 [3], идентичный международному стандарту IEC 60904-9, делит ИСИ для фотоэлектрических приборов на три класса по каждому из трёх основных параметров (табл. 2).

Таблица 1

Сравнительные характеристики действующих ИСИ

	Источник излучения	Размеры освещаемой поверхности, м	Неравномерность энергетической освещенности, %	Максимальная удельная мощность, Вт/м <sup>2</sup>
ИСИ ТБК-120	Ксеноновые лампы	2×2	< 10	1600
ИСИ ГВУ-600	Ксеноновые лампы	4×4	< 10	1600
ИС-500	Ксеноновые лампы	3×8	< 10	1500
ИСИ LSS	Ксеноновые лампы	6×5	0,5	2600
ИСИ SPF	Ксеноновые лампы	$D = 15$	1	4200

Одним из наиболее перспективных направлений в конструировании ИСИ для наземных условий АМ1,5 в настоящее время считается применение высокоэффективных светодиодов [4]. Светодиодные ИСИ, в сравнении с ИСИ на основе традиционных световых источников, обладают рядом преимуществ, которые наиболее полно могут быть раскрыты при использовании их в термовакuumных испытаниях, проводимых в ходе наземной отработки КА. Помимо большей

энергоэффективности, возможности регулировки в максимальных пределах мощности и спектра светового потока и лучших массогабаритных и эксплуатационных характеристик, главным преимуществом является возможность размещения светового источника светодиодного ИСИ непосредственно внутри термовакuumной камеры, в непосредственной близости к объекту испытаний [5]. Такое размещение позволяет наиболее просто реализовать ещё один, также считающийся

ся перспективным, принцип модульного построения, при котором трансформируемый ИСИ представляет набор отдельных блоков внутри термовакуумной камеры, скомпонованных исходя из требований к термовакуумной обработке конкрет-

ного КА [2; 6]. При этом следует особо отметить, что размещение светового источника светодиодного ИСИ в ограниченном пространстве требует от него как высокой эффективности, так и максимальной компактности.

Таблица 2

Классификация ИСИ, ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016

Класс	Спектральное соответствие для всех диапазонов	Неравномерность энергетической освещенности, %	Временная нестабильность, %	
			Кратковременная	Долговременная
A	0,75 ... 1,25	2	0,5	2
B	0,6 ... 1,4	5	2	5
C	0,4 ... 2	10	10	10

## 1. Постановка задачи

Световой поток светодиодного ИСИ складывается из излучения множества отдельных групп светодиодов, образующих матрицу с распределенными параметрами. Исследования показывают, что для матрицы из отдельных точечных источников с широким углом распределения, которыми являются светодиоды, крайне трудно получить удельную мощность выше 1000 Вт/м<sup>2</sup> и приемлемую неравномерность светового потока одновременно [7]. В то же время уменьшение углов распределения повышает эффективность матрицы и позволяет при том же уровне освещенности обойтись меньшим количеством светодиодов. Поэтому в существующих светодиодных ИСИ для наземных условий АМ1,5 светодиодная матрица дополнительно оснащена оптической системой, занимающей большую часть объема светового источника. Следовательно, для адаптации светодиодного ИСИ к наземной обработке КА одной из главных задач является разработка высокоэффективной и, в то же время, максимально компактной оптической системы, суммирующей с минимальными потерями излучение множества светодиодов по спектру, углу и площади в единое световое поле.

Исходя из предполагаемой модульной конструкции ИСИ, а также из размерных ограничений свободного пространства существующих крупногабаритных термовакуумных камер, в частности, действующих в настоящее время в АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва» ТБК-120, КВУ-400 и ГВУ-600, размеры освещаемой одним светодиодным модулем площади приняты равными 320×320 мм, или 0,1 м<sup>2</sup>. По этим же причинам, а также в связи с падением уровня освещенности при увеличении расстояния, практический интерес для

рассмотрения представляет расстояние от модуля до освещаемой площади в диапазоне 0,5–1 м.

## 2. Первичная оптическая система

Для получения узкоугольных световых распределений применяют первичные оптические элементы, специально оптимизированные для работы с различными типами светодиодов [8]. В большинстве случаев это оптические элементы с преломляющими или отражающими поверхностями, которые устанавливают непосредственно над излучающей поверхностью светодиода. Наиболее распространёнными конструкциями с малыми углами распределения и высокой световой эффективностью являются параболические рефлекторы (ПР) и TIR оптические элементы (англ. TIR – Total Internal Reflection), содержащие поверхности, работающие по принципу полного внутреннего отражения, а также подобные им элементы [9].

Параболические рефлекторы представляют зеркала параболической формы, фокусирующие световой поток. Преимуществом параболических рефлекторов считаются простота конструкции и, как правило, меньший размер по сравнению с TIR оптическими элементами. Главный недостаток параболических рефлекторов состоит в том, что они перенаправляют только боковые лучи. Поскольку ненаправленные центральные лучи имеют наивысшую интенсивность, это приводит к значительным потерям направленного светового потока.

TIR оптические элементы состоят из нескольких частей и содержат, как минимум, внутреннюю поверхность, через которую излучение поступает в оптический элемент, и боковую поверхность, работающую по принципу полного

внутреннего отражения и перенаправляющую боковые лучи. Теоретически характеристики TIR-оптических элементов лучше, поскольку они перенаправляют все лучи, в том числе центральные, что повышает световую эффективность. К недостаткам можно отнести большие размеры и сложность конструкции.

Расчёт поверхностей оптических элементов является сложной задачей. В случае точечного источника излучения её решение приводит к интегрированию системы дифференциальных уравнений первого порядка. В случае протяжённого источника излучения для расчёта оптических поверхностей используются различные оптимизационные методы, позволяющие подобрать их параметры и обеспечить наиболее точное формирование заданного распределения освещённости [10–12]. Для решения подобных задач существуют различные коммерческие программные продукты: LightTools, FRED, TracePro [13] и др. В частности, при помощи программного обеспечения FRED производителя Photon Engineering в [7] проведено моделирование в монохромном режиме светодиодного источника для ИСИ наземных условий AM1,5, результаты которого могут быть использованы для анализа характеристик светодиодного ИСИ для наземной обработки КА. Следует отметить, что сделанные при моделировании допущения позволяют оценить характеристики светового потока лишь в первом приближении. Для более точной оценки необходимо моделирование светодиодного источника во всём диапазоне длин волн с учётом соответствия мощности, спектральной точности и непараллельности светового потока условиям открытого космоса AM0.

### 2.1. Моделирование одиночных элементов

При формировании начальных условий одиночный светодиод принят как расходящийся источник света с излучающей поверхностью 1×1 мм, лучи которого генерируются в случайных направлениях в угловом диапазоне 120°. Размер

измеряемых участков равен 10×10 мм. Таким образом, на освещаемой площади 320×320 мм находится 1024 участка, что в 16 раз выше необходимого минимального разрешения [3]. В качестве первичных оптических элементов выбраны параболический рефлектор диаметром 18 мм и два TIR оптических элемента диаметром 13 и 27 мм с заявленными производителем углами распределения 6°.

Изначально в программной среде FRED смоделированы распределения световых потоков одиночных элементов – светодиодов без оптики и с установленной над ними различной первичной оптикой. В первом случае, из-за значительного уровня шума профили распределения освещённости дополнительно интерполированы при помощи простого и точного метода полиномиальной интерполяции, реализованного с использованием функций подгонки в пакете прикладных программ MATLAB.

Полученные интерполированные трёхмерные профили распределения освещённости одиночного светодиода и диагональные поперечные сечения профилей для расстояний 0,5 и 1 м показаны на рис. 1 и 2.

На рис. 3 сравниваются диагональные сечения профилей распределения освещённости одиночных элементов с установленными 18 мм параболическим рефлектором, 13 мм и 27 мм TIR оптическими элементами на расстояниях 0,5 и 1 м.

Из результатов видно, что все представленные оптические элементы обладают высокими коллимирующими свойствами. 27 мм TIR оптический элемент обладает наибольшей эффективностью, а 18 мм параболический рефлектор – наименьшей. Однако в первом случае на расстоянии 0,5 м наблюдается провал в центре профиля характеристики направленности, вызванный сферической aberrацией (рис. 4). Поперечная сферическая aberrация определяется расстоянием между осью и наиболее расходящимся лучом [14] и в данном случае приводит к тому, что уровень освещённо-

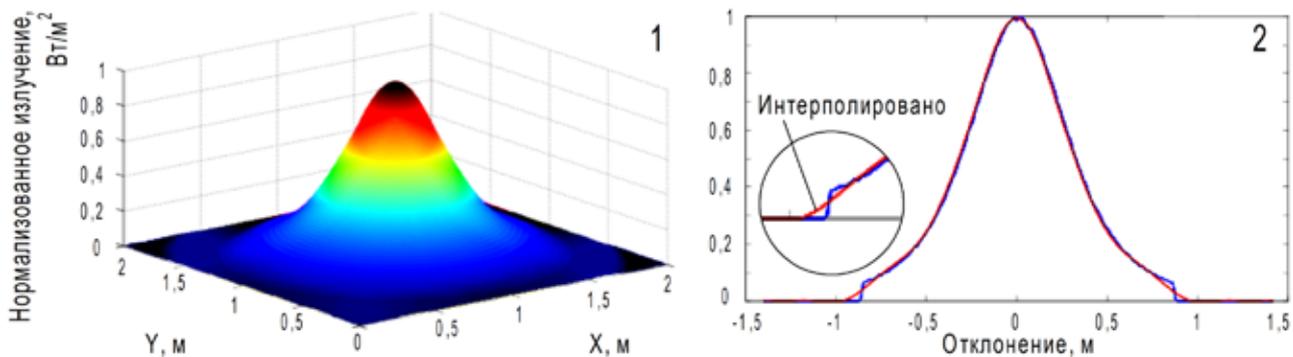


Рис. 1. Нормализованный интерполированный трёхмерный профиль распределения освещённости (1) и диагональное поперечное сечение профиля (2) одиночного светодиода на расстоянии 0,5 м

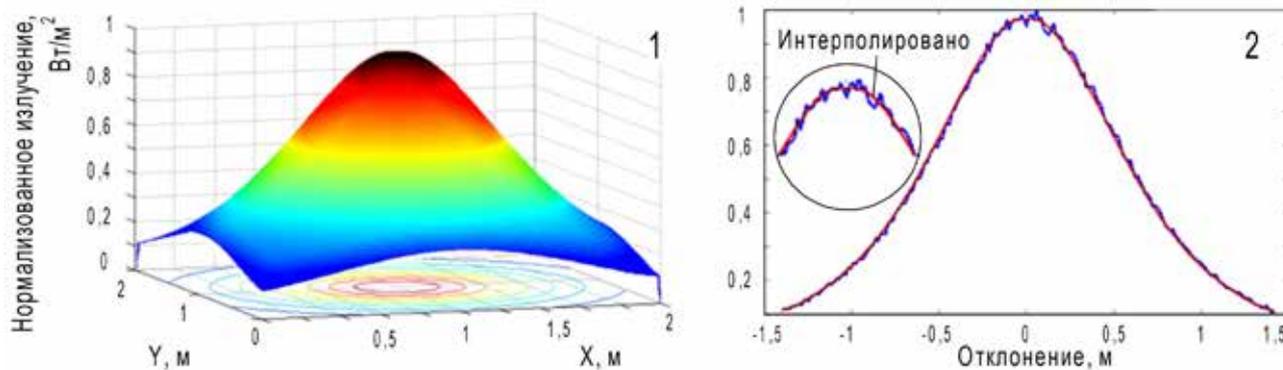


Рис. 2. Нормализованный интерполированный трёхмерный профиль распределения освещённости (1) и диагональное поперечное сечение профиля (2) одиночного светодиода на расстоянии 1 м

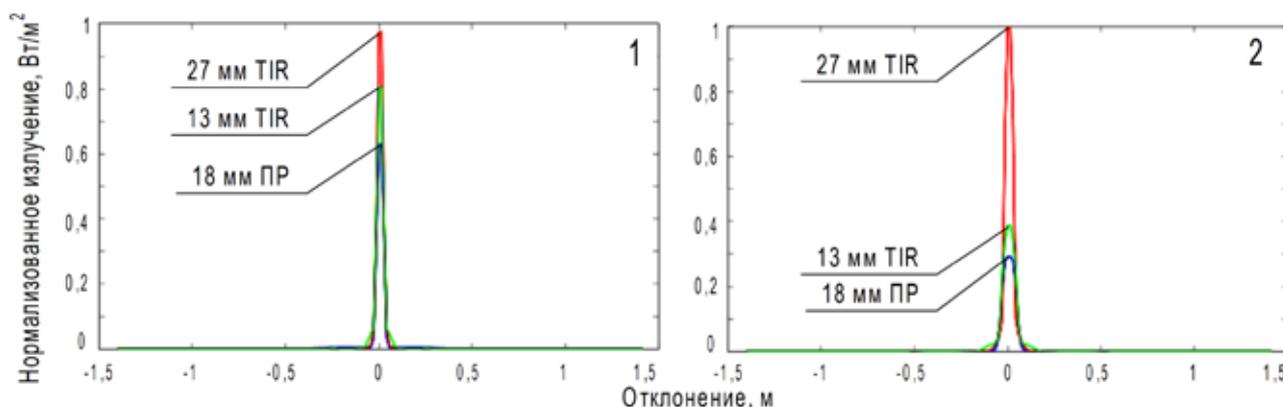


Рис. 3. Диагональные поперечные сечения профилей распределения освещённости различных оптических элементов, нормализованные к наибольшему значению, на расстояниях 0,5 м (1) и 1 м (2)

сти будет несколько ниже ожидаемого, поскольку наибольшие значения соответствуют боковым пикам.

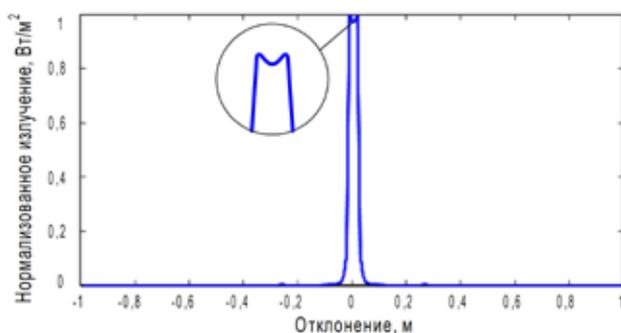


Рис. 4. Поперечное сечение профиля распределения освещённости одиночного светодиода с 27 мм TIR на расстоянии 0,5 м

## 2.2. Моделирование первичной оптической системы

На основе полученных моделей одиночных элементов далее смоделированы распределения световых потоков нескольких вариантов светодиода с различными видами и количествами первичных оптических элементов.

Максимальное количество оптических элементов в светодиодной матрице физически ограничено и зависит от их размеров, взаимной компоновки и углов распределения. Оптимальный вариант представляет собой компромисс между межэлементными расстояниями, размерами и углами распределения светового потока оптических элементов. В любом случае, при расстоянии от светового источника до освещаемой площади более 1 м освещённость падает настолько, что получить необходимый уровень освещённости становится достаточно сложно.

Значения удельной мощности и неравномерности излучения различных моделей сведены в табл. 3; наиболее характерные случаи проиллюстрированы на рис. 10–13.

На рис. 5 представлены трёхмерные интерполированные профили распределения освещённости модели с равномерно размещёнными в матрице 2475 светодиодами без оптических элементов на расстояниях 0,5 м и 1 м.

Полученная на расстоянии 0,5 м освещённость, равная  $3654 W/m^2$ , значительно превышает требуемый уровень, но неравномерность, состав-

ляющая 10,45 %, неудовлетворительна. На расстоянии 1 м неравномерность улучшается до 2,74 %, но освещённость находится ниже требуемого уровня в пределах 1000 Вт/м<sup>2</sup>.

На рис. 6 представлены трёхмерные профили распределения освещённости модели с 612 параболическими рефлекторами диаметром 18 мм на расстояниях 0,5 и 1 м.

Таблица 3

Удельная выходная мощность и неравномерность излучения для различных оптических оформлений

Оптические элементы	Количество элементов	Расстояние	P, Вт/м <sup>2</sup>	Неравномерность		Рисунок
				%	Класс по [3]	
Нет	2475	0,5	3654	10,45		5 (1)
	2475	1	1015	2,75		1 (2)
	2997	0,5	4408	11,02		
	2997	1	1227	2,92		
	3570	0,5	5248	10,43		
	3570	1	1462	2,77	B	
18 мм ПР	390	0,5	1398	4,40	B	
	390	1	1020	10,10		
	517	0,5	1541	3,49	B	
	517	1	1093	1,56		
	612	0,5	1637	3,43	B	6 (1)
	612	1	1130	0,83		6 (2)
	885	0,5	1882	3,36	B	
	885	1	1225	0,85		
27 мм TIR	189	0,5	671	20,03		
	189	1	629	8,52		
	248	0,5	671	20,03		
	248	1	629	8,52		
	390	0,5	702	19,13		7 (1)
	390	1	663	2,99		7 (2)
	612	0,5	710	19,00		
	612	1	672	2,73		
	885	0,5	722	18,24		
	885	1	685	2,89		
13 мм TIR	390	0,5	1916	74,76		
	390	1	1694	60,61		
	612	0,5	2527	23,80		
	612	1	2224	28,17		
	715	0,5	2651	7,58	C	
	715	1	2366	14,42		
	885	0,5	2727	2,72	B	
	885	1	2482	6,42	C	
	945	0,5	2741	2,58	B	
	945	1	2505	5,78	C	
	1207	0,5	2786	1,88	A	8 (1)
	1207	1	2576	3,35	B	8 (2)

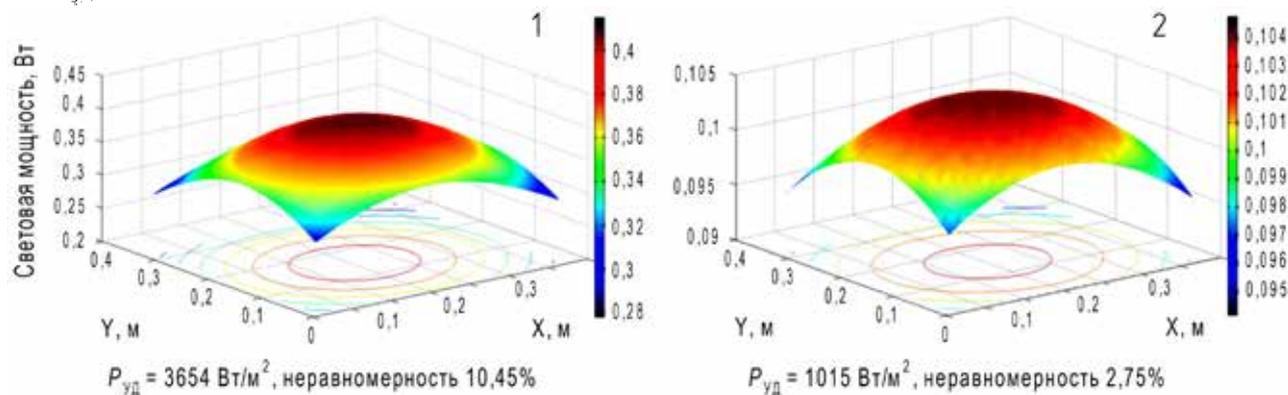


Рис. 5. Трёхмерные интерполированные профили распределения освещённости 2475 светодиодов без оптических элементов на расстояниях 0,5 м (1) и 1 м (2)

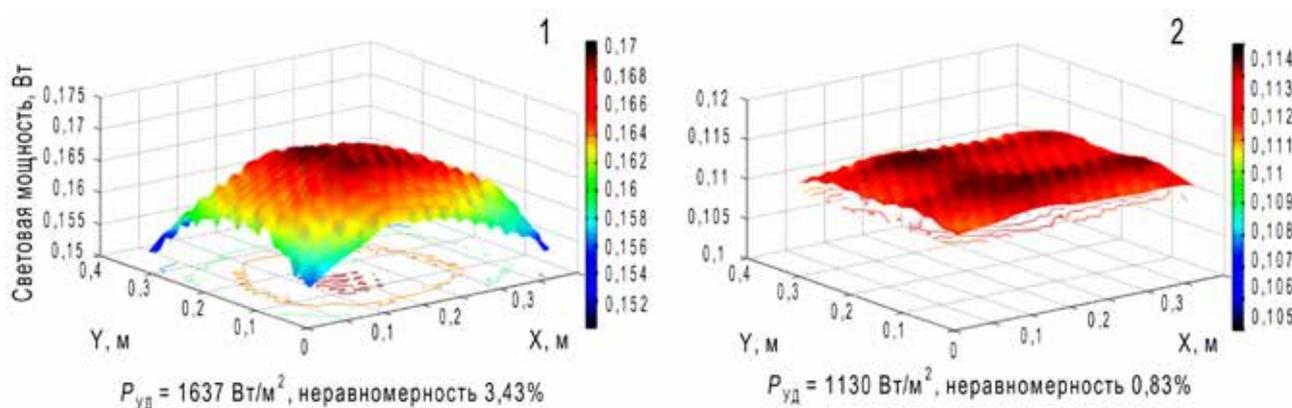


Рис. 6. Трёхмерные профили распределения освещённости 612 светодиодов с 18 мм параболическими рефлекторами на расстояниях 0,5 м (1) и 1 м (2)

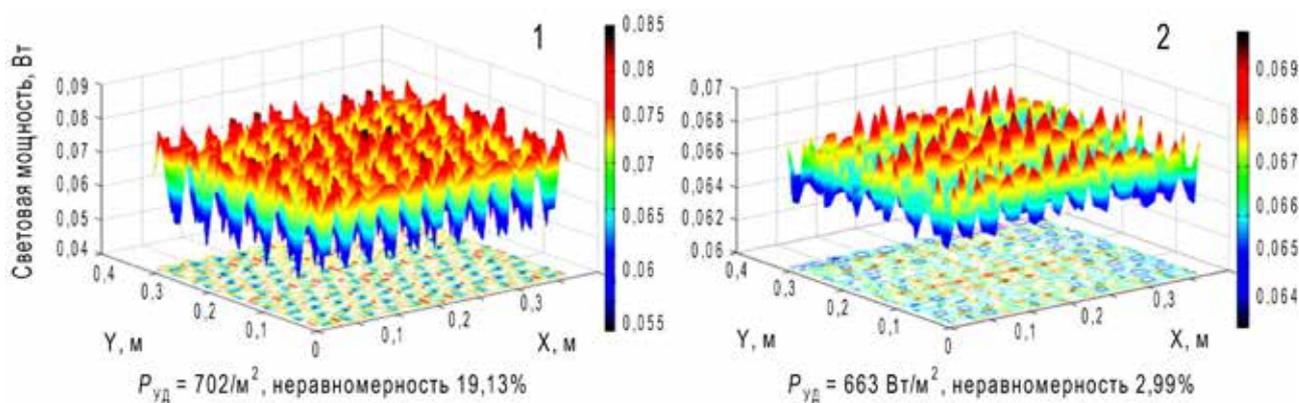


Рис. 7. Трёхмерные профили распределения освещённости 390 светодиодов с 27 мм TIR оптическими элементами на расстояниях 0,5 м (1) и 1 м (2)

На рис. 7 представлены трёхмерные профили распределения освещённости модели с 390 TIR оптическими элементами диаметром 27 мм на расстояниях 0,5 и 1 м.

Невысокий уровень освещённости можно объяснить как недостаточным количеством TIR оптических элементов, так и их слишком большим размером, поскольку расходящиеся лучи элементов, расположенных на краях матрицы, лишь частично попадают на освещаемую площадь.

На рис. 8 представлены трёхмерные профили распределения освещённости модели с 1207 TIR оптическими элементами диаметром 13 мм на расстояниях 0,5 и 1 м.

При одинаковом количестве оптических элементов световая эффективность модели на основе TIR оптических элементов малого размера значительно выше. Можно предположить, что дальнейшее уменьшение угла распределения TIR оптических элементов с 6 до 4 градусов в соответствии

с предъявляемыми требованиями по непараллельности светового потока к ИСИ для условий АМО и, как следствие, уменьшение размеров элементов дополнительно повысит эффективность светового источника.

Неравномерность светового потока может быть дополнительно уменьшена при использовании оптических элементов, формирующих световые распределения не круглой, а прямоугольной формы. Метод компьютерного моделирования внутренней поверхности компактного TIR опти-

ческого элемента, формирующего однородное узкоугольное распределение любой формы, в том числе прямоугольной, подробно описан в [11].

Следует учитывать, что проявившаяся в одной из моделей сферическая aberrация при получении полного спектра может привести к неточному сложению световых потоков от светодиодов с разными длинами волн.

Для дальнейшего повышения характеристик светового потока светодиодного источника ИСИ необходимо применение вторичной оптики [15].

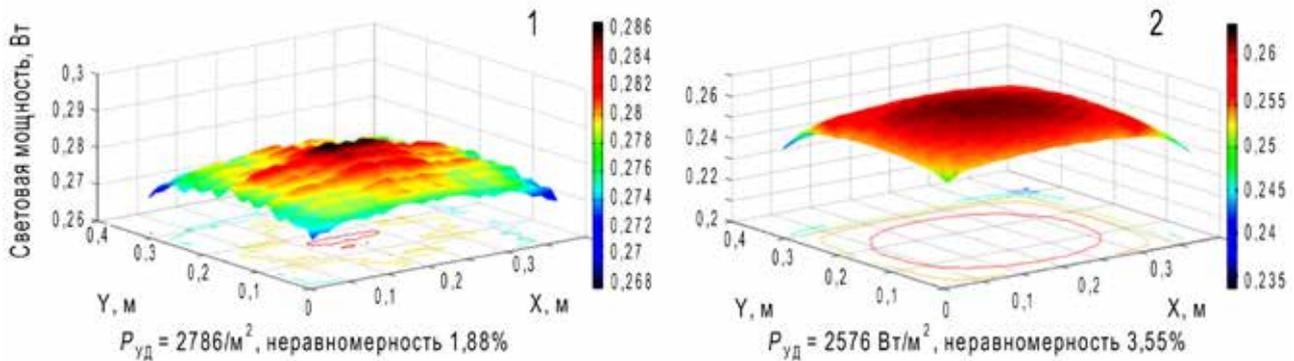


Рис. 8. Трёхмерные профили распределения освещённости 1207 светодиодов с 13 мм TIR оптическими элементами на расстояниях 0,5 м (1) и 1 м (2)

### 3. Вторичная оптическая система

Сравнительный анализ существующих видов вторичной оптики, пригодной для формирования выходного излучения светодиодного ИСИ, показывает, что наиболее оптимальный вариант представляют лучевые гомогенизаторы [7].

Существуют два основных типа гомогенизаторов: неизображающие и изображающие [16].

Неизображающие гомогенизаторы (рис. 9) состоят из преломляющего микролинзового раstra и сферической линзы. Микролинзовый растр  $M_1$  разделяет входной световой поток на отдельные элементарные лучи, а сферическая линза  $O_1$  суммирует их на плоскости.

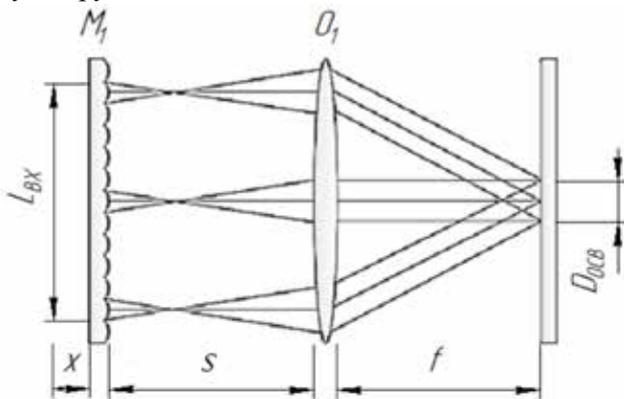


Рис. 9. Неизображающий гомогенизатор:  $M_1$  – микролинзовый растр,  $O_1$  – сферическая линза

Изображающие гомогенизаторы (рис. 10) состоят из двух идентичных микролинзовых растров  $M_1, M_2$  и сферической линзы  $O_1$ .

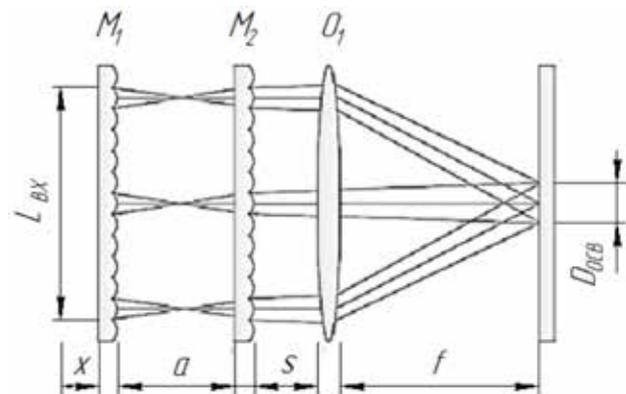


Рис. 10. Изображающий гомогенизатор:  $M_1, M_2$  – микролинзовые растры,  $O_1$  – сферическая линза

Как неизображающий, так и изображающий гомогенизаторы могут использоваться для освещения площадей с высокой однородностью. Неизображающие гомогенизаторы в основном используются в конструкциях с большой площадью освещаемой поверхности и малыми числовыми апертурами. Они дешевле, легче в настройке, из-за использования меньшего количества оптических поверхностей происходит меньше оптических потерь. С другой стороны, они чувствительны к дифракционным эффектам, а угол расходимости входного

луча значительно влияет на качество плоского участка характеристики распределения освещённости.

Изображающие гомогенизаторы больше подходят для конструкций, требующих высокой однородности, поскольку получаемое качество плоского участка профиля распределения освещённости в этом случае выше и не так критично к углу расхождения входного луча. Размер освещаемой области можно дополнительно варьировать, изменяя расстояние между двумя микролинзовыми растрами. С другой стороны, они дороже, сложнее в настройке, а оптические потери выше из-за использования большего количества оптических поверхностей.

Исследования в этой области [7] показали, что изображающие гомогенизаторы больше подходят для применения в светодиодном ИСИ, главным образом, по причине высокой чувствительности неизображающих гомогенизаторов к углу расхождения первичной оптики. На рис. 11 хорошо заметна разница в равномерности распределения освещённости двух математических моделей одиночного светодиода, оснащённого первичной оптикой в виде шестиградусного TIR оптического элемента и вторичной оптикой в виде неизображающего и изображающего гомогенизаторов.

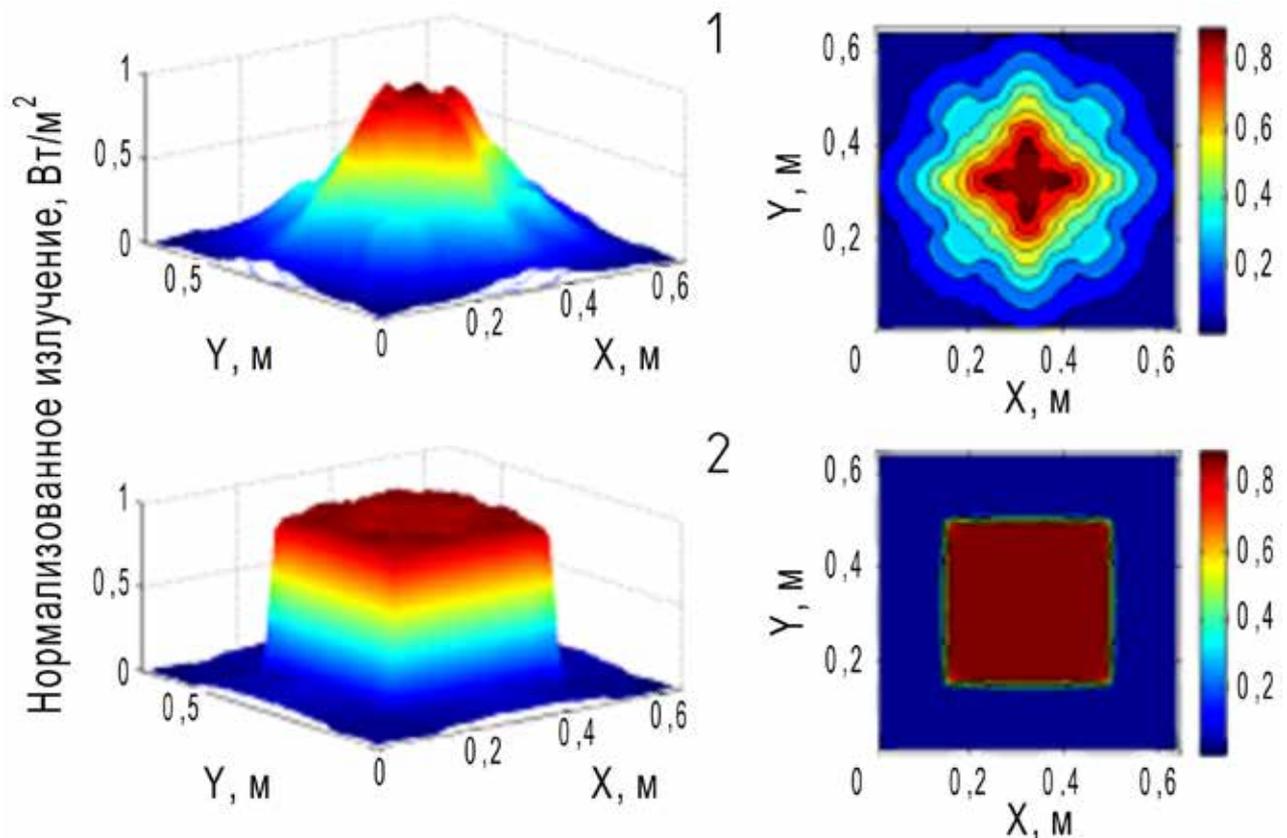


Рис. 11. Нормализованное выходное излучение одиночного светодиода: первичная оптика – шестиградусный TIR оптический элемент, вторичная оптика – неизображающий (1) или изображающий (2) гомогенизатор

### 3.1. Моделирование вторичной оптической системы

Как оптимальный вариант, далее рассмотрен изображающий гомогенизатор на основе микролинзовых растров из квадратных выпуклых микролинз. Для исключения сферических aberrаций выбраны асферические микролинзы. Центральная длина волны излучения монохромных светодиодов 590 нм, её полная ширина при половинном максимуме – 20 нм. Значение световой мощности для всех светодиодов принято равным 1 Вт.

Допущения, что все светодиоды идентичны и монохромны, достаточно, чтобы доказать необходимость и эффективность вторичной оптики.

Однако оно не позволяет оценить хроматические aberrации, которые могут возникнуть в результате сложения излучения светодиодов с разными длинами волн. Кроме этого, предполагается, что все светодиоды имеют одинаковую мощность излучения. Однако некоторые из светодиодов с различными длинами волн могут иметь меньшую выходную мощность, особенно в областях, близких к границам заданного диапазона, что приведёт к некоторому снижению общей световой эффективности.

Расстояние между сферической линзой и областью освещения  $f$  равно фокусному расстоянию сферической линзы  $f_{O1}$ . Оба микролинзовых массива идентичны.

В ходе моделирования определены оптимальные расстояния между различными элементами: расстояние между светодиодной матрицей и первым микролинзовым массивом матриц  $x$ , расстояние между первым и вторым микролинзовым массивом  $a$  и расстояние между вторым микролинзовым массивом и сферической линзой  $s$ . Результаты приведены в табл. 4. Видно, что суммарное расстояние между всеми элементами вторичной оптики составит примерно 70 мм, что

приведёт к незначительному увеличению соответствующего габаритного размера оптической системы светодиодного модуля.

Неоднородность светового потока модели с 612 светодиодами на освещаемой площади  $320 \times 320$  мм составила 0,29 %. Удельная мощность светового потока достигает  $1316 \text{ Вт/м}^2$ , что вплотную приближается к требуемому значению  $1340\text{--}1440 \text{ Вт/м}^2$ .

Результат моделирования показан на рис. 12.

Таблица 4

Оптимальные значения расстояний  $a, s, x$

Параметр	Обозначение	Значение, мм
Шаг микролинзовых массивов	$p$	2,5
Фокусное расстояние микролинзовых массивов	$f_M$	14,2
Фокусное расстояние линзы $O_1$	$f_{O1}$	2000
Расстояние источник – $M_1$	$x$	20
Расстояние $M_1 - M_2$	$a$	14,2
Расстояние $M_2 - O_1$	$s$	14,2
Расстояние $O_1 - D_{OCB}$	$f$	2000

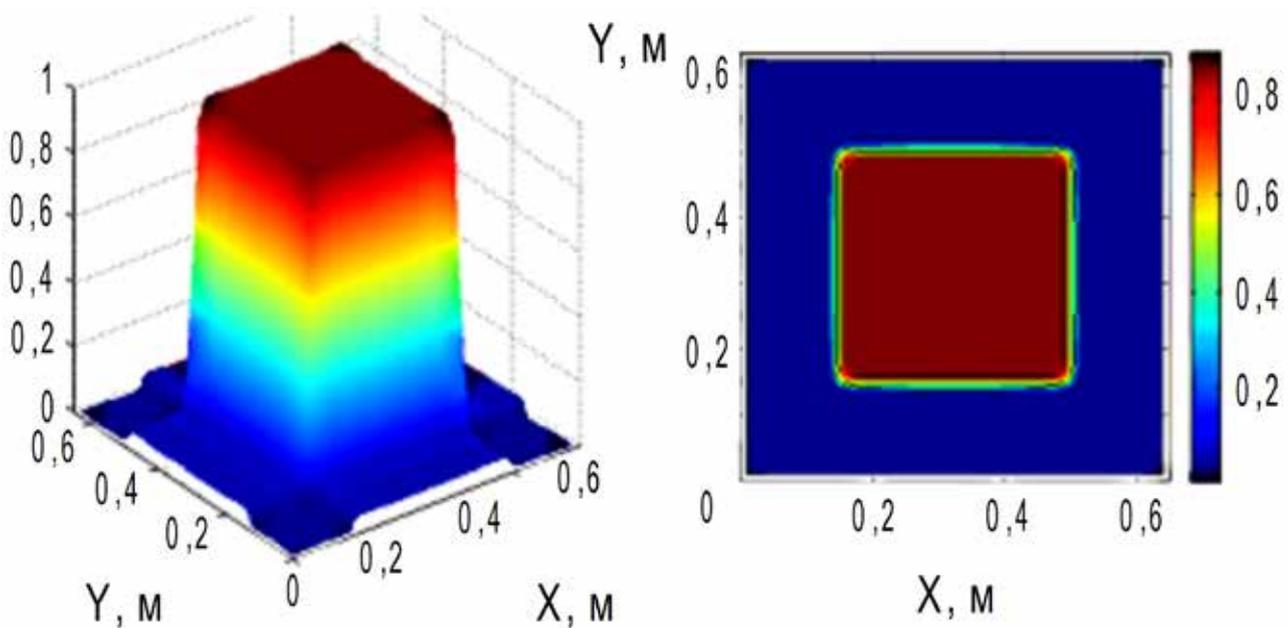


Рис. 12. Нормализованный профиль распределения освещённости 612 светодиодов с шестиградусными TIR в качестве первичной оптики и изображающим гомогенизатором в качестве вторичной оптики

### Заключение

Результаты показывают, что основные характеристики смоделированного светодиодного источника имитатора солнечного излучения не уступают или вплотную приближаются к анало-

гичным характеристикам, предъявляемым к имитаторам солнечного излучения для наземной отработки космических аппаратов.

Для получения необходимого уровня освещённости требуется неоправданно большое количество светодиодов без первичной оптики,

при этом из-за значительного рассеивания крайне трудно получить приемлемую эффективность, направленность и однородность светового потока одновременно. В то же время при использовании первичных оптических элементов аналогичные характеристики достигаются с намного меньшим количеством светодиодов. Следовательно, светодиодный источник имитатора солнечного излучения обязательно должен иметь первичную оптику.

Результаты моделирования показывают, что только модели с TIR оптическими элементами малого размера обеспечивают необходимые характеристики при расстоянии от светового источника до освещаемой площади в пределах 1 м, в частности, неравномерность светового потока, соответствующую требованиям класса С по ГОСТ Р МЭК 60904-9. Размеры первичной оптической системы, состоящей из оптических элементов малого размера, позволяют объединить её со светодиодной матрицей в компактный модуль с минимальными габаритами.

При этом следует отметить, что TIR оптические элементы в силу их некоторых свойств могут

недостаточно точно суммировать световые потоки от светодиодов с разными длинами волн, используемых для получения полного спектра.

Более высокие значения основных характеристик светового потока могут быть получены при совместном применении первичной и вторичной оптики. Самые высокие показатели возможны при использовании в качестве вторичной оптики изображающего гомогенизатора. В этом случае неравномерность светового потока может превосходить требования высшего класса А по ГОСТ Р МЭК 60904-9, а расстояние до освещаемой площади – увеличено до 2 м. Однако применение вторичной оптики приведёт к некоторому увеличению массогабаритных показателей и снижению эффективности светового источника имитатора солнечного излучения.

Исходя из размеров световых полей действующих ИСИ (табл. 1), можно определить общее число смоделированных светодиодных модулей площадью 0,1 м<sup>2</sup>: для ИСИ, аналогичного ИСИ ТБК-120 – не менее 40 шт.; для ИСИ, аналогичного ИСИ ГВУ-600 – не менее 160 шт.

## Список литературы

- [1] Крат С. А., Христин В. В. Тепловакуумная обработка КА: развитие современных тенденций // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4 (30). С. 126–129.
- [2] Аслаян Р. О., Анисимов Д. И., Марченко И. А., Пантелеев В. И. Имитаторы солнечного излучения для термовакуумных испытаний космического аппарата // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18. № 2. С. 323–327.
- [3] ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016. Приборы фотоэлектрические. Часть 9. Требования к характеристикам имитаторов солнечного излучения. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.
- [4] Reynolds K. LED-based sun-simulator design: technical and commercial considerations // Photonics Spectra, March 2015. pp. 54–58.
- [5] Двирный Г. В., Шевчук А. А., Двирный В. В., Елфимова М. В., Крушенко Г. Г. Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной обработки космических аппаратов // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19. № 2. С. 271–280.
- [6] Аслаян Р. О., Марченко И. А., Анисимов Д. И. и др. Разработка компактных источников излучения солнечного спектра // Материалы XX Междунар. науч. конференции «Решетневские чтения» / АО «ИСС» им. акад. М. Ф. Решетнёва. Красноярск, 2016. С. 436–437.
- [7] Plita F. Optical design of a fully LED-based solar simulator. PhD thesis. Loughborough, Loughborough University, July 2015. 186 p.
- [8] Байнева И. И., Байнев В. В. Оптические системы для светодиодов // Фотоника. 2016. № 2. С. 84–93.
- [9] Chen J.-J., Wang T.-Y., Huang K.-L., Liu T.-S., Tsai M.-D., Lin C.-T. Freeform lens design for LED illumination // Optics Express, May, 2012, vol. 20, no. 10, pp. 10984–10995.
- [10] Моисеев М. А., Борисова К. В., Бызов Е. В., Досколович Л. Л. Оптимизационный метод для расчета TIR оптических элементов, включающий процедуру быстрой трассировки лучей // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37. № 1. С. 51–58.
- [11] Андреева К. В., Моисеев М. А., Кравченко С. В., Досколович Л. Л. Метод расчета оптических элементов с поверхностью свободной формы, работающих по принципу полного внутреннего отражения // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 4. С. 467–474.
- [12] Досколович Л. Л., Борисова К. В., Моисеев М. А. Расчет зеркала для формирования заданного непрерывного распределения освещенности на основе метода согласованных квадрик // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 3. С. 347–356.
- [13] Байнева И. И. Моделирование световых приборов в программном комплексе TRACEPRO // Материалы XIII Всеросс. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики» / АУ «Технопарк Мордовия». 2017. С. 202–208.

- [14] Hecht E. Optics (5th Edition). Harlow, Pearson Education, 2017. 729 p.
- [15] Vu N. H., Pham T. T., Shin S. LED uniform illumination using double linear fresnel lenses for energy saving // Energies, 2017, no. 10 (12), 2017. pp. 1–15. doi:10.3390/en10122091
- [16] Dickey F. M., Holswade S. C., Shealy D. L. Laser Beam Shaping Applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005. 376 c.

## OPTICAL SYSTEM OF PERSPECTIVE LED-BASED SOLAR SIMULATOR FOR SPACECRAFT GROUND TESTING APPLICATIONS

A. A. Shevchuk<sup>1,2</sup>, G. V. Dvirniy<sup>3</sup>, G. G. Krushenko<sup>4</sup>,  
V. V. Dvirniy<sup>1,2</sup>, M. V. Elfimova<sup>5</sup>

<sup>1</sup>JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>3</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>4</sup>Institute of Computational Modelling SB RAS, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>5</sup>Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia,  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

*The transition to the production of new generation spacecraft requires a significant improvement in the methods and means of ground experimental testing, improving the accuracy of test equipment. One of the basic and most complex elements of the test equipment used in complex thermal vacuum testing of spacecraft is the solar simulator. Currently, a promising direction is the construction of solar simulators based on highly efficient LEDs that have significant advantages over traditional sources. Design of a highly efficient and at the same time compact optical system summing the emission of many individual LEDs of the LED array over the spectrum, angle and area into a uniform light field with minimal losses is the one of base tasks in development of adapted for ground testing spacecraft solar simulator. The article analyzes the mathematical modeling results of LED solar simulator's light source on the example of several models with different numbers of LEDs, both without optical elements, and with various primary optical elements. Results it follows that the LED solar simulator radiation must necessarily have, at a minimum, a primary optical system. The influence of the number, type and size of the primary optical elements in the matrix on the characteristics of the light flux is determined. The combined use of primary and secondary optical systems leads to a further light characteristics improvement of the LED solar simulator, but at the cost of some reduction in overall efficiency. In general, the characteristics of the modeled light source correspond or closely approach to required ones, which indicates that it is possible in principle to create a solar simulator based on LED sources for ground testing of spacecraft.*

*Keywords: spacecraft, ground testing, thermal vacuum testing, solar simulator, optical system, light emitting diode.*

### References

- [1] Krat S. A., Hristich V. V. *Teplovakuumnaya otrabotka KA: razvitie sovremennykh tendentsiy* [Spacecraft thermal vacuum optimization: development of new tendencies] // Vestnik SibGAU, 2010, no. 4, pp. 126–129. (In Russian)
- [2] Aslanyan R. O., Anisimov D. I., Marchenko I. A., Panteleev V. I. *Imitatory solnechnogo izlucheniya dlya termovakuumnykh ispytaniy kosmicheskogo apparata* [Solar simulators for thermal vacuum tests of spacecraft] // Siberian Journal of Science and Technology, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 323–327. (In Russian)
- [3] *GOST R MEK 60904–9–2016. Pribory fotoelektricheskie. Chast' 9. Trebovaniya k harakteristikam imitatorov solnechnogo izlucheniya* [State Standard R IEC 60904–9–2016. Photovoltaic devices. Part 9. Solar simulator performance requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 12 p. (In Russian)
- [4] Reynolds K. LED-based sun-simulator design: technical and commercial considerations // Photonics Spectra, March 2015, pp. 54–58.
- [5] Dvirniy G. V., Shevchuk A. A., Dvirniy V. V., Elfimova M. V., Krushenko G. G. *Analiz vozmozhnosti sozdaniya imitatora solnechnogo izlucheniya na osnove svetodiodnykh istochnikov dlya nazemnoj otrabotki kosmicheskikh apparatov* [Analysis of LED-based solar simulator development capability for spacecraft ground testing application]. Siberian Journal of Science and Technology, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 271–280. (In Russian)

- [6] Aslanyan R. O., Marchenko I. A., Anisimov D. I. *Razrabotka kompaktnyh istochnikov izlucheniya solnechnogo spektra* [Designing small-sized solar spectrum thermal radiation sources]. *Materialy XX Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Reshetnevskie chteniya»* [Materials of the XX International Scientific Conference «Reshetnev Readings»]. JSC ISS-Reshetnev. Krasnoyarsk, 2016, pp. 436–437. (In Russian)
- [7] Plita F. Optical design of a fully LED-based solar simulator. PhD thesis. Loughborough, Loughborough University, July 2015. 186 p.
- [8] Bayneva I. I., Baynev V. V. *Opticheskie sistemy dlya svetodiodov* [Optical systems for light-emitting diodes] // *Photonics*, 2016, no. 2, pp. 84–93. (In Russian)
- [9] Chen J.-J., Wang T.-Y., Huang K.-L., Liu T.-S., Tsai M.-D., Lin C.-T. Freeform lens design for LED illumination // *Optics Express*, May, 2012, vol. 20, no. 10, pp. 10984–10995.
- [10] Moiseyev M. A., Borisova K. V., Byzov E. V., Doskolovich L. L. *Optimizacionnyj metod dlya rascheta TIR opticheskikh ehlementov, vklyuchayushchij proceduru bystroj trassirovki lučej* [Optimization method for computation of TIR optical elements based on quick raytracing procedure] // *Computer optics*, 2013, vol. 37, no. 1, pp. 51–58. (In Russian)
- [11] Andreeva K. V., Moiseev M. A., Kravchenko S. V., Doskolovich L. L. *Metod rascheta opticheskikh ehlementov s poverhnost'yu svobodnoj formy, rabotayushchih po principu polnogo vnutrennego otrazheniya* [Design of optical elements with TIR free-form surface] // *Computer optics*, 2016, vol. 40, no. 4, pp. 467–474. (In Russian)
- [12] Doskolovich L. L., Borisova K. V., Moiseyev M. A. *Raschet zerkala dlya formirovaniya zadannogo nepreryvnogo raspredeleniya osveshchennosti na osnove metoda soglasovannykh kvadrik* [Design of a mirror for generating a prescribed continuous illuminance distribution based on the supporting quadric method]. *Computer optics*, 2015, vol. 39, no. 3, pp. 347–356. (In Russian)
- [13] Bayneva I. I. *Modelirovanie svetovyh priborov v programmnom komplekse TRACEPRO* [Modelling of light devices in the program complex TRACEPRO]. *Materialy XIII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Problemy i perspektivy razvitiya otechestvennoj svetotekhniki, ehlektrotekhniki i ehnergetiki»* [Materials XIII All-Russian Scientific Conference «Problems and perspectives of the development of domestic lightings, electronics and energy»]. AU «Tekhnopark Mordoviya». Saransk, 2017, pp. 202–208. (In Russian).
- [14] Hecht E. *Optics* (5th Edition). Harlow, Pearson Education, 2017. 729 p.
- [15] Vu N. H., Pham T. T., Shin S. LED uniform illumination using double linear fresnel lenses for energy saving // *Energies*, 2017, no. 10 (12), 2017, pp. 1–15. doi:10.3390/en10122091
- [16] Dickey F. M., Holswade S. C., Shealy D. L. *Laser Beam Shaping Applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005. 376 p.