

СХЕМА СУММИРОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ ОТ НАБОРА ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП ДЛЯ ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2011 г. С. А. Крат*; А. А. Филатов**, канд. техн. наук; В. В. Христич*

* ОАО “Информационные Спутниковые Системы им. акад. М.Ф. Решетнева”, г. Железногорск Красноярского края

** Научно-производственное предприятие волоконно-оптического и лазерного оборудования, Санкт-Петербург

E-mail: filatov@volo.ru, kratsv@iss-reshetnev.ru

Рассматривается возможность создания оптической схемы суммирования световых потоков для имитатора солнечного излучения на основе современных газоразрядных ламп семейства XBO. Разработана расчетная модель светооптической схемы в программном пакете ZEMAX. Проведены экспериментальные исследования схемы суммирования.

Ключевые слова: тепловакуумные испытания, схема суммирования, имитатор солнечного излучения, источник излучения, световой поток.

Коды OCIS: 220.1770, 220.4840

Поступила в редакцию 22.03.2011

Одним из основных этапов наземной экспериментальной отработки космических аппаратов считаются тепловакуумные испытания. Объектом испытаний является теплофизическая модель космического аппарата или его составные части. Целью испытаний является экспериментальная отработка теплового режима и тепловых схем вновь разрабатываемых внешних элементов изделия, приборов и оборудования при имитации штатных условий выведения и орбитального функционирования. Тепловакуумные испытания проводятся на специально оборудованных стендах – вакуумных установках, оснащенных криогенными экранами и имитаторами внешних тепловых и световых потоков.

Ключевым и наиболее сложным элементом стенда для тепловакуумных испытаний является имитатор солнечного излучения, который должен повторять параметры Солнца по спектральному диапазону 0,2–2,5 мкм, интенсивности на уровне 1340–1440 Вт/м² и параллельности излучения. Имитатор Солнца представляет собой источник излучения и оптическую систему, направляющую поток в рабочую зону и формирующие заданное пространственное распределение в этой зоне. Так, на одном из уникальных стендов для наземной экспериментальной отработки космических аппара-

тов на ОАО “Информационные спутниковые системы” до недавнего времени использовали имитатор Солнца, построенный на базе ламп ДКсРМ-55000 российского производства. Но поставки этих ламп прекратились по причине снятия их с производства и стал актуален вопрос о замене источника излучения. Причем новые лампы по характеристикам не должны уступать старым и должны серийно выпускаться.

В данной работе обоснована возможность модернизации имитатора солнечного излучения (ИСИ) с суммированием световых потоков от нескольких современных газоразрядных ламп семейства XBO для имитатора солнечного излучения на базе термобарокамеры.

Проблема выбора ламп была подробно рассмотрена авторами настоящей работы. Выбор был остановлен на лампах фирмы OSRAM семейства XBO.

Проведем краткое сравнение характеристик ламп ДКсРМ-55000 с OSRAM XBO 10000 OFR. Так, лампа ДКсРМ-55000 имеет электрическую мощность 55 кВт, оптическую мощность примерно 15 кВт, при этом требуется водяное охлаждение лампы, средний ресурс лампы составляет 200 часов. Лампа OSRAM XBO 10000 OFR при электрической мощности 10 кВт обеспечивает оптическую мощность

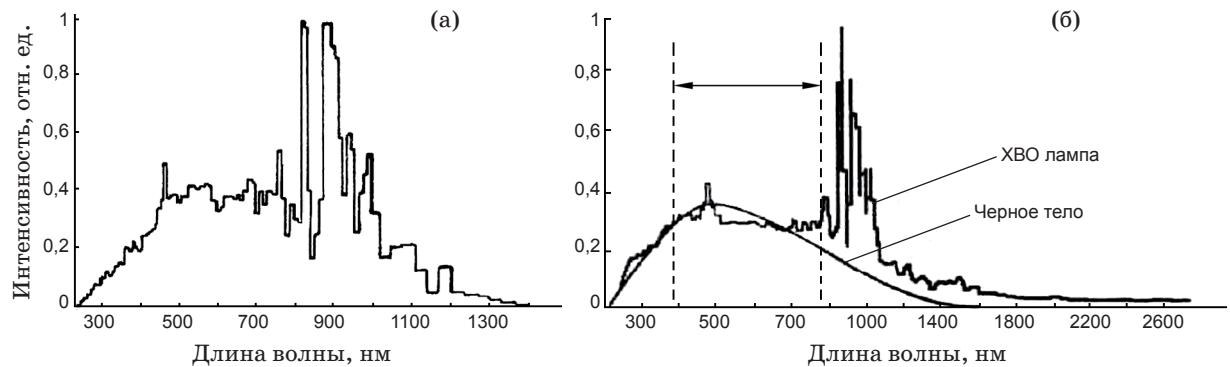


Рис. 1. Спектральное распределение энергии излучения. а – лампа ДКсРМ-55000, б – лампа OSRAM ХВО 10000 OFR.

приблизительно 6 кВт, требует принудительного воздушного охлаждения и средний ресурс лампы составляет 500 часов. Из сравнения характеристик видно, что лампа OSRAM ХВО превосходит лампу ДКсРМ-55000 по совокупности характеристик. Спектры излучения обеих ламп (рис. 1) близки к солнечному [1, 2].

Лампы ХВО принадлежат к семейству газоразрядных ламп. В этих лампах свет генерируется разрядной дугой, свободно горящей в чистом ксеноне между двумя электродами. Длина дуги такая же, как расстояние между двумя электродами и составляет несколько миллиметров [2]. Основная часть энергии сосредоточена внутри плазменного шарика размером 2–3 мм. Это означает, что эти лампы близки к идеальному точечному источнику света. Это особенно важно для применения их в имитаторах солнца – размещение лампы в фокусах оптических элементов позволяет с наибольшей точностью создавать и направлять световой поток в необходимом направлении.

При проектировании светооптической схемы ИСИ испытательного стенда было принято решение оставить в схеме смеситель, иллюминатор и параболоидное зеркало, учитывая высокую степень их интеграции с конструкцией барокамеры. Таким образом, основной задачей при создании новой схемы стала разработка системы суммирования пучков излучения от семи ламп OSRAM XBO 10000 OFR, способная работать совместно с имеющимся смесителем и параболоидным зеркалом и обеспечивающая приемлемую эффективность и равномерность светового потока на выходе всей схемы. Необходимое количество ламп можно вычислить по формуле

$$N = PS/P_L \eta_L \tau k_p, \quad (1)$$

где P – номинальная плотность мощности светового потока в камере $\text{Вт}/\text{м}^2$, S – площадь пятна засветки м^2 , P_L – номинальная электрическая мощность лампы Вт , η_L – КПД лампы, τ – коэффициент пропускания (эффективность) светооптической схемы, k_p – коэффициент запаса по мощности, задающий рабочую мощность лампы.

Плотность светового потока должна быть не менее $1400 \text{ Вт}/\text{м}^2$. В расчетах примем $P = 1500 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Площадь светового пятна 4 м^2 . Согласно данным производителя, приблизительно 80% электрической энергии, подводимой к лампе, преобразуется в световой поток. При этом 20% мощности приходится на тепловое излучение электродов, а оставшаяся часть преобразуется в излучение дуги. Таким образом, можно считать, что $\eta_L = 0,6$. Данный вывод подтвержден экспериментально в ходе работ по модернизации ИСИ. Как показывают результаты моделирования схемы в программном пакете ZEMAX, общий коэффициент пропускания схемы равен 0,19. Коэффициент запаса принимается равным 2, т. е. лампы эксплуатируются на уровне половинной мощности, что увеличивает их ресурс. Подставляя данные значения в формулу (1) находим, что $N = 12,5$. На основании этих расчетов принято решение использовать в каждой ветви схемы по семь ламп.

Как видно из рис. 2, если на элемент смесителя падает параллельный пучок лучей, то передняя поверхность смесителя фокусирует пучок на задней поверхности, после которой пучок превращается в расходящийся. Стро-

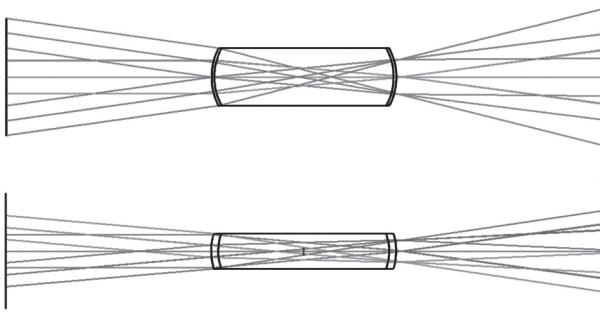


Рис. 2. Принцип работы оптического смесителя (ход лучей показан в двух взаимно перпендикулярных сечениях).

го параллельный пучок лучей может быть получен только от точечного источника света. Светящееся тело лампы имеет конечные размеры, поэтому реальный пучок на входе смесителя будет обладать некоторой расходимостью. По мере увеличения расходимости на входе смесителя лучи отклоняются все дальше от оптической оси смесителя. При некотором значении расходимости наступает момент, когда пучок лучей, пройдя через переднюю поверхность

смесителя, попадет на боковую грань элемента смесителя, претерпевая на ней полное внутреннее отражение. Это ограничивает допустимую расходимость на входе смесителя. Предельные значения углов расходимости могут быть вычислены по формуле

$$\alpha_X = A_X n / 2L, \quad \alpha_Y = A_Y n / 2L, \quad (2)$$

где n – показатель преломления материала элемента смесителя. Для заданного элемента смесителя $\alpha_X \approx 8^\circ$, $\alpha_Y \approx 12,7^\circ$. Таким образом, схема суммирования должна обеспечить на входе оптического смесителя квазипараллельный пучок с расходимостями в двух перпендикулярных направлениях не более чем $\alpha_X \approx 8^\circ$, $\alpha_Y \approx 12,7^\circ$. При этом достигается оптимальное согласование схемы суммирования, оптического смесителя и параболоидного зеркала, что обеспечивает минимальные энергетические потери.

Рассмотрим несколько возможных вариантов построения схемы суммирования. Известно, что луч, проходящий через фокальную точку линзы (или сферического зеркала), после линзы пойдет параллельно оптической оси линзы. На рис. 3 представлены несколько вариантов схемы суммирования. Опуская

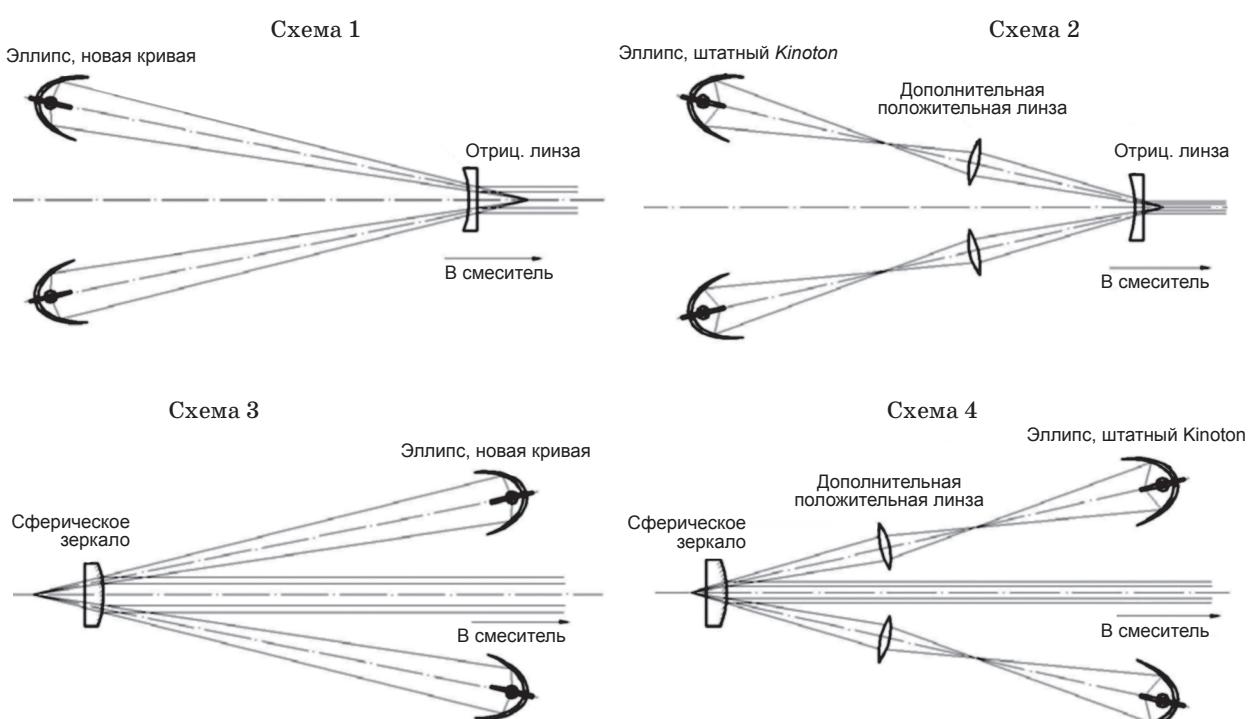


Рис. 3. Варианты компоновки схемы суммирования излучения от нескольких ламп OSRAM XBO 10000 OFR.

промежуточные расчеты параметров каждой из схем, кратко резюмируем их преимущества и недостатки. Заметим при этом, что модули *Kinoton* [3] оснащены штатным рефлектором с эллиптической кривой. Однако параметры штатного рефлектора не допускают его использование в ИСИ.

Схема 1. Рефлекторы ламп наклонены таким образом, чтобы их оптические оси пересекались в фокальной точке отрицательной линзы. При этом после линзы образуется набор квазипараллельных пучков лучей от каждого из рефлекторов, которые направляются в оптический смеситель. Данная схема содержит минимальное число элементов, однако при этом требуется изготовление рефлекторов с кривой, отличной от стандартных рефлекторов, входящих в состав модулей *Kinoton*.

Схема 2. Идея данной схемы повторяет идею схемы 1. Для адаптации штатных рефлекторов *Kinoton* используется дополнительная положительная линза. Расчеты показывают, что для эффективного улавливания светового потока от штатного рефлектора диаметр этих линз должен составлять не менее 250 мм. С точки зрения стоимости, данная схема получается дороже схемы 1, кроме того, положительная линза будет являться источником дополнительных потерь из-за френелевских отражений. Основанием для рассмотрения данной схемы было то, что на стадии рассмотрения компоновок схемы отсутствовал поставщик рефлекторов.

Схемы 3 и 4. Данные схемы основаны на тех же принципах, что и схемы 1 и 2, только вместо отрицательной линзы используется

отрицательное выпуклое зеркало. Использование зеркала вместо линзы оправдано тем, что для изготовления линзы требуется крупногабаритная кварцевая заготовка, которая в данное время в России не производится. Для зеркала можно было бы использовать более доступный в России ситалл, либо простое оптическое стекло.

По совокупности характеристик оптимальной схемой признана схема 1. Она содержит минимальное число элементов, что обеспечивает минимальные энергетические потери. Кроме того, данная схема является наиболее дешевой в изготовлении. Исходная геометрия схемы суммирования приведена на рис. 4, где использованы следующие обозначения: X , Y , Z – оси системы координат, совпадающей с системой координат, принятой в программном пакете ZEMAX; (X_1, Y_1) , ..., (X_7, Y_7) – координаты вершин рефлекторов в системе координат XYZ ; A_x , A_y – углы наклона оптических осей рефлекторов относительно оптической оси отрицательной линзы; L – расстояние от вершины рефлектора до передней поверхности отрицательной линзы; F_2 – расстояние от вершины рефлектора до 2-й, дальней, фокальной точки; d – осевая толщина отрицательной линзы; S_f – передний фокальный отрезок отрицательной линзы; R – радиус кривизны передней поверхности отрицательной линзы; a – высота луча на передней поверхности линзы.

Если считать источник излучения точечным, то расчет схемы суммирования сводится к отысканию параметров F_2 и R . Обратимся к рис. 4. Пренебрегая толщиной линзы, можно приближенно считать

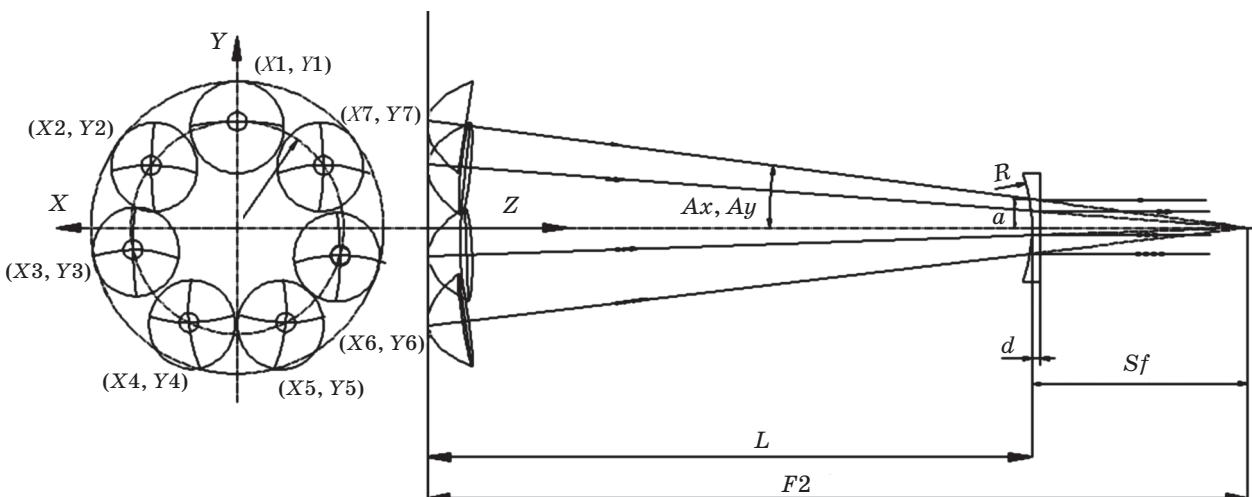


Рис. 4. Исходная геометрия схемы суммирования.

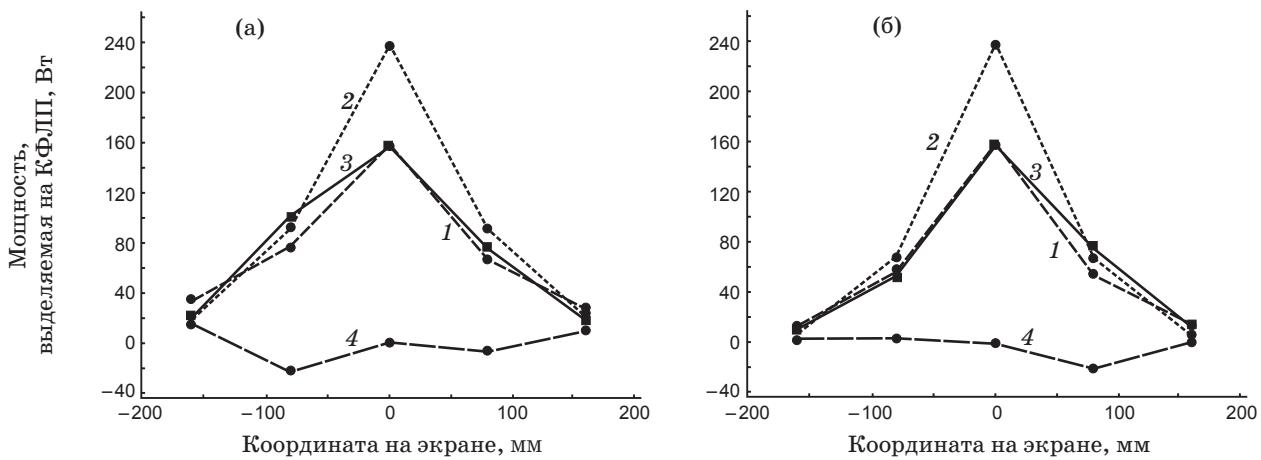


Рис. 5. Расчетные (а) и экспериментальные (б) кривые мощности светового потока во втором фокусе рефлектора.

$$Sf \approx f' \approx R/n - 1, \quad (3)$$

где n – показатель преломления материала линзы. Для геометрии, изображенной на рисунке, справедливы следующие соотношения

$$\begin{cases} a = f' \tan A_X \\ L + f' = F2 \\ \sin A_X = Y1/F2. \end{cases} \quad (4)$$

Например, задаваясь значениями $F2 = 3000$ мм и $a = 150$ мм, получаем $f' = -1000$ мм, $R = -f'(n - 1) = -1000(1,45 - 1) = -450$ мм. Эти данные могут быть использованы для построения вычислительной модели светооптической схемы в программном пакете ZEMAX.

По рассчитанным параметрам были изготовлены опытные образцы рефлекторов и суммирующих линз. Затем в программе Solid Works была задана 3D-модель рефлектора с поверхностью, построенной по результатам измерений координат 800 точек поверхности изготовленного образца. Измерения координат точек проводили на координатной измерительной машине. Полученная 3D-модель была импортирована в расчетную модель ИСИ, построенную в программном пакете ZEMAX.

Экспериментально определяли плотность мощности в 25 точках экрана, помещенного во второй фокус рефлектора. Детектором служил стандартный калибранный датчик КФЛП (кремниевый фотоприемник лучистого потока) со специально изготовленной ослабляющей сеткой. Для сопоставления экспериментальных данных с данными расчета проведено численное моделирование поставленного экс-

perimenta. В плоскость, проходящую через второй фокус рефлектора, помещено 25 детекторов с размерами, равными размерам датчика КФЛП. Расчетные и экспериментальные данные приведены на рис. 5. Видно, что расчетные данные обнаруживают хорошее сходство в центральной части пятна. Большие расхождения экспериментальных и расчетных данных в углах экрана, по-видимому, связаны с низкой точностью измерений при помощи датчика КФЛП с ослабляющей сеткой в областях с низкой освещенностью. Уменьшение осевой интенсивности в случае реального рефлектора объясняется аберрациями рефлектора, возникающими из-за отклонения профиля поверхности от идеального. Из сравнения кривых видно, что энергия из центрального максимума перетекает в периферийную область. В пользу хорошего соответствия расчетной модели эксперименту говорит такая характеристика, как мощность, приходящая в заданную область экрана. Вычислим мощность в области экрана, в которой производились измерения (размеры области равны 500×400 мм), а также в круге диаметром 400 мм. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Для проверки расходимости после рассеивающей линзы была собрана аналогичная установка – на расстоянии 500 мм от линзы перпендикулярно ее оптической оси был установлен экран размером 400×500 мм. Расчетная модель, соответствующая этому эксперименту, приведена на рис. 6.

Как было показано выше, для того чтобы световой пучок проходил смеситель без геомет-

Таблица 1. Результаты расчетов

Рассматриваемый случай	Мощность, приходящаяся на экран 400×500 мм, Вт	Эффективность (мощность на экране 400×500 мм, отнесенная к световой мощности лампы)	Мощность в круге диам. 400 мм	Эффективность (мощность в круге диам. 400 мм, отнесенная к световой мощности лампы)
Эксперимент	800,99	0,52	704,49	0,46
Расчет для реальной кривой	774,59	0,50	739,9	0,48
Расчет для идеальной кривой	811,26	0,53	789,5	0,51

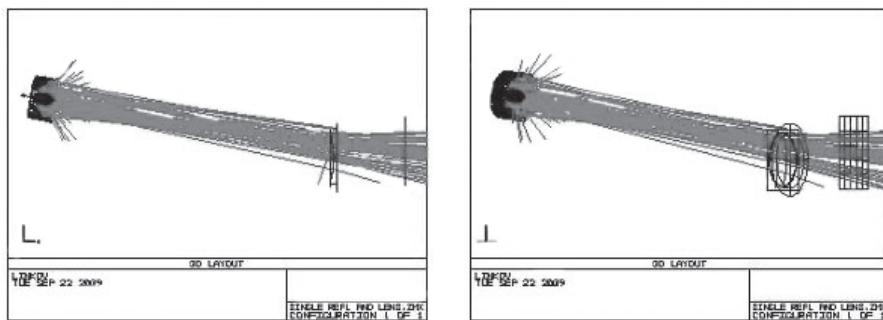


Рис. 6. Расчетная модель схемы проверки расходимости за линзой.

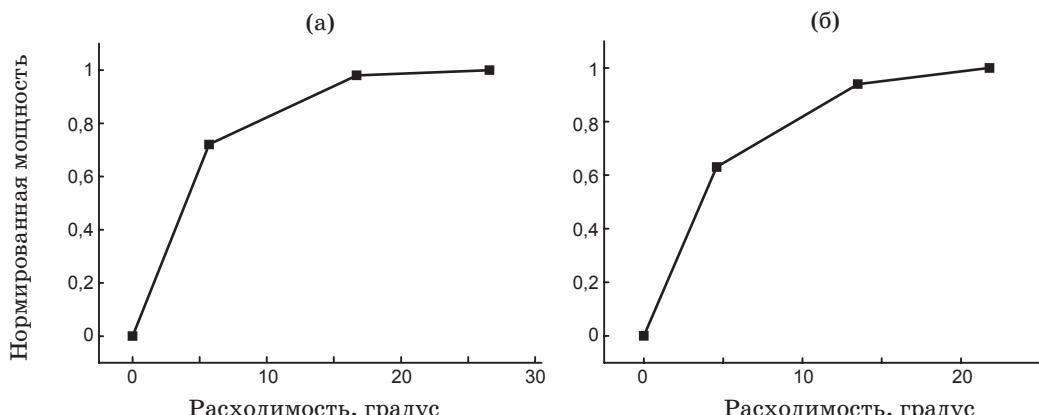


Рис. 7. Экспериментальные зависимости концентрации мощности в угле расходимости по двум координатам: а – расходимость по оси X, б – расходимость по оси Y.

рических потерь, расходимость пучка должна составлять $\alpha_X \approx 8^\circ$, $\alpha_Y \approx 12,7^\circ$. При измерении расходимости принято указывать уровень мощности потока, по которому определяется расходимость. Так, при измерении расходимости лазерных пучков наиболее часто пользуются расходимостью по уровню половинной интенсивности, либо по уровню интенсивности $1/e^2$. В рассматриваемом случае определения расходимости за линзой пользоваться этими определениями расходимости неудобно,

поскольку они не дают информации о потерях мощности за счет того, что расходимость превосходит критические значения. Более уместно будет определить, какая доля мощности сосредоточена в пределах этих критических углов. Для ответа на этот вопрос необходимо построить график концентрации мощности в зависимости от угла расходимости. Графики концентрации мощности в зависимости от расходимости приведены на рис. 7.

Таблица 2. Отношение мощности на детекторе к суммарной мощности ламп, установленных в различных частях схемы

Положение детектора	Отношение мощности на детекторе к суммарной мощности ламп
перед линзой	0,51
за смесителем	0,40
на зеркале	0,24
на мишени	0,19

Из графиков видно, что по оси X в пределах критического угла $\alpha_X \approx 8^\circ$ содержится приблизительно 80% мощности. По оси Y в пределах критического угла $\alpha_Y \approx 12,7^\circ$ содержится приблизительно 90% мощности. Данный вывод хорошо согласуется с расчетными данными.

В табл. 2 приведены отношения мощности на рассматриваемом детекторе к суммарной мощности светового щита. Из приведенных результатов видно, что данное отношение для детектора, установленного перед отрицательной линзой, составляет 0,51, а для детектора, установленного за смесителем, – 0,40.

Частное от деления этих значений характеризует эффективность передачи мощности в последовательности элементов “отрицательная линза–смеситель”. Данная эффективность равна $0,40/0,51 = 0,78$, т. е. 78% процентов лучей, выходящих из линзы, проходят смеситель и попадают на зеркало.

На основе результатов моделирования и экспериментальной проверки показано, что предлагаемая схема суммирования с эллиптическими рефлекторами и суммирующей отрицательной линзой может быть использована для работы в составе ИСИ испытательного стенда.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Лампа ДКсРМ-55000-УХЛ-4. Техническое описание. ИКБЖ.675637. 004 ТО.
2. XBO Theatre Lamps // Technology and Applications. Copyright OSRAM SYLVANIA Inc. 2000. P. 10–12.
3. Kinoton // Operating Manual // Gigalight Special Lamphouse. Copyright by KINOTON Filmtheater und Studiotechnik GmbH. 2002.