

## РАСЧЁТ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСВЕЩЁННОСТИ В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ОБЛАСТЯХ С БОЛЬШИМ СООТНОШЕНИЕМ СТОРОН

*Досколович Л.Л.<sup>1,2</sup>, Моисеев М.А.<sup>1,2</sup>, Султанов А.Х.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН,

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет),

<sup>3</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет

### Аннотация

Рассмотрена конструкция оптического элемента, содержащая две преломляющих оптических поверхности: первая поверхность преобразует сферический пучок от источника в цилиндрический, вторая - формирует заданное распределение освещённости от падающего цилиндрического пучка. Предложен метод расчёта таких элементов для формирования заданных распределений освещённости. Рассчитаны два оптических элемента, формирующих равномерное распределение освещённости от ламбертовского источника в прямоугольных областях с размерами 17 м×4 м и 17 м×2 м. Световая эффективность рассчитанных оптических элементов составляет более 83 %, а неравномерность формируемого распределения освещённости - менее 9 %.

*Ключевые слова:* расчёт оптических элементов, распределение освещённости, светоизлучающий диод, полное внутреннее отражение, коллимирование.

### Введение

Формирование заданного распределения освещённости в прямоугольной области является актуальным для задач проектирования систем уличного, промышленного и жилого освещения. Задача расчёта оптического элемента, формирующего заданное распределение освещённости, состоит в определении формы его преломляющих (отражающих) поверхностей. Решение данной задачи сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных типа Монже-Ампера [1-3]. В общем трёхмерном случае решение данного уравнения является крайне сложным. Аналитическое решение возможно только в частных случаях с радиальной или продольной симметрией [4-10]. Для расчёта оптических элементов, формирующих заданные распределения освещённости в прямоугольной области, используются оптимизационные итерационные процедуры [11-21].

Методы [11-21] предназначены для расчёта оптических элементов, имеющих единственную рабочую преломляющую поверхность свободной формы (free-form). Использование оптических элементов такого типа для генерации заданных распределений освещённости в вытянутых прямоугольных областях приводит к существенным потерям световой эффективности. Это связано с ограниченными возможностями рефракционной поверхности при повороте лучей на большие углы. Например, при показателе преломления материала 1,5 максимальный угол поворота луча при преломлении на границе материал-воздух составляет менее 49°.

В работе [22] предложена конструкция оптического элемента, позволяющая с высокой световой эффективностью генерировать для компактного источника излучения диаграммы направленности (ДН) в виде отрезка. Предложенная конструкция содержит две группы рабочих поверхностей. Первая группа поверхностей отвечает за преобразование

сферического пучка от источника излучения в пучок с цилиндрическим волновым фронтом. Вторая группа представлена цилиндрической внешней поверхностью, которая формирует ДН в виде отрезка при цилиндрическом падающем пучке. Высокая световая эффективность формирования ДН достигается за счёт использования эффекта полного внутреннего отражения при формировании цилиндрического пучка. В работе [23] рассмотрена модификация конструкции [22] на случай формирования ДН прямоугольной формы. Необходимо отметить, что при формировании прямоугольной ДН решение [23] является приближенным. Кроме того, оно неприменимо для формирования распределений освещённости в прямоугольной области.

В данной работе для формирования вытянутых прямоугольных распределений освещённости предлагается использовать конструкцию оптического элемента [22] с внешней поверхностью свободной формы (free-form). Такая поверхность позволяет преобразовать падающий на неё цилиндрический пучок и сформировать заданное распределение освещённости в виде вытянутого прямоугольника. В работе приведён метод расчёта внешней поверхности и рассчитаны оптические элементы, формирующие равномерные распределения освещённости в прямоугольных областях с угловыми размерами 140°×67° и 140°×34°. Энергетическая эффективность рассчитанных оптических элементов составляет более 83%.

### Постановка задачи

Пусть в начале координат расположен точечный (компактный) источник излучения с заданной интенсивностью излучения  $I(\gamma)$ , где  $\gamma$  - зенитный угол сферической системы координат. Задача состоит в расчёте оптического элемента, расположенного над источником излучения, из условия формирования заданного распределения освещённости

$E_0(u, v)$  в плоскости  $z = f$ , где  $(u, v)$  – декартовы координаты в выходной плоскости.

Для формирования распределений освещённости в вытянутых областях (типа прямоугольника с большим соотношением сторон) в работе предлагается использовать конструкцию оптического элемента, изображённую на рис. 1 [22]. Поверхности  $a$ ,  $b$  и  $c$  получены вращением коллимирующего профиля, показанного на рис. 2, вокруг оси  $y$ . Кривая  $a$  профиля на рис. 2 является частью гиперболы и выполняет функцию коллиматора, поверхность  $b$  создаёт мнимый источник в точке  $M$ , а кривая  $c$  является частью параболы с фокусом в точке  $M$  и также коллимирует лучи от источника излучения. Поверхности  $a$ ,  $b$  и  $c$  преобразуют сферический волновой фронт от источника излучения в цилиндрический волновой фронт с осью  $y$ . Расчёт этих поверхностей был подробно рассмотрен в [22].

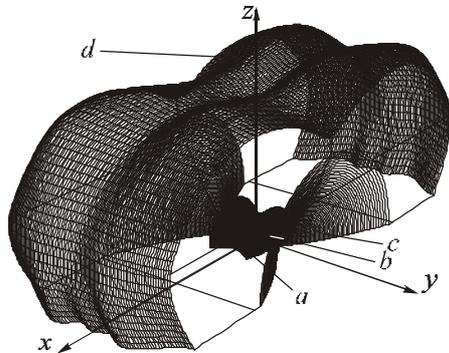


Рис. 1. Конструкция оптического элемента

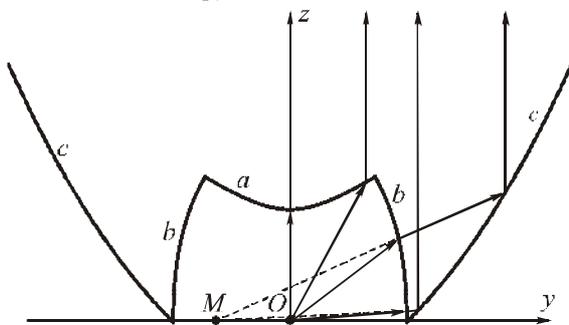


Рис. 2. Коллимирующий профиль

Внешняя поверхность  $d$  на рис. 1 имеет свободную форму (free-form). Она должна преобразовывать цилиндрический волновой фронт от поверхностей  $a$ ,  $b$  и  $c$  таким образом, чтобы в выходной плоскости формировалось распределение освещённости  $E(u, v)$ , максимально близкое к требуемому распределению освещённости  $E_0(u, v)$ .

Функция радиус-вектора внешней поверхности может быть представлена как некоторая параметризованная функция  $r(\varphi, y; \mathbf{c})$ , определённая в цилиндрических координатах. Здесь  $\varphi$  – это угол между плоскостью, содержащей вектор направления и ось  $y$ , и плоскостью  $Oyz$ . В этом случае расчёт формы

внешней поверхности  $d$  сводится к решению задачи минимизации функции нескольких переменных:

$$f(\mathbf{c}) = \|E(u, v; \mathbf{c}) - E_0(u, v)\| \rightarrow \min. \quad (1)$$

**Расчёт распределения освещённости в выходной плоскости**

Необходимым этапом решения обратной задачи, состоящей в определении вектора параметров  $\mathbf{c}$  внешней преломляющей поверхности из условия минимума функции невязки (1), является решение прямой задачи. Прямая задача состоит в расчёте распределения освещённости в выходной плоскости при заданной внешней поверхности  $r(\varphi, y; \mathbf{c})$ . Рассмотрим некоторую цилиндрическую поверхность с радиусом  $R$  и осью  $y$ , расположенную внутри оптического элемента. Так как конфигурация внутренних поверхностей оптического элемента, формирующих цилиндрический волновой фронт, известна, будем считать известным и распределение освещённости  $E'(\varphi, y)$  на этой цилиндрической поверхности.

Согласно закону сохранения светового потока, световой поток  $d\Phi$ , проходящий через элементарную площадку  $dS$  на цилиндрической поверхности, равен световому потоку, попавшему на соответствующий элемент с площадью  $dudv$  в выходной плоскости. С учётом френелевских потерь получим следующее соотношение для распределений освещённости:

$$T(\varphi, y; \mathbf{c}) E'(\varphi, y) R d\varphi dy = E(\mathbf{u}(\varphi, y; \mathbf{c})) dudv, \quad (2)$$

$$E(\mathbf{u}(\varphi, y; \mathbf{c})) = \frac{T(\varphi, y; \mathbf{c}) E'(\varphi, y) R}{|J(\mathbf{u}(\varphi, y; \mathbf{c}))|},$$

где  $\mathbf{u}(\varphi, y; \mathbf{c})$  – точка в выходной плоскости, в которую попадает луч, прошедший через точку  $(\varphi, y)$  цилиндрической поверхности,

$$J(\mathbf{u}(\varphi, y; \mathbf{c})) = \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \varphi} - \text{якобиан перехода от}$$

координат  $(\varphi, y)$  к координатам  $(u, v)$ . Вычисление координат точки  $\mathbf{u}(\varphi, y; \mathbf{c})$  подробно рассмотрено в [20-21].

Используя следующее свойство двумерной дельта-функции Дирака [24]

$$\frac{f(x, y)}{|J(\mathbf{u}(x, y))|} \Big|_{\substack{x=\tilde{x} \\ y=\tilde{y}}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \delta(\tilde{u} - u(x, y), \tilde{v} - v(x, y)) dx dy \quad (3)$$

где  $(\tilde{x}, \tilde{y})$  – такая точка в пространстве  $(x, y)$ , что  $u(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{u}$ , а  $v(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{v}$ , представим распределение

освещённости в выходной плоскости  $E(u, v; \mathbf{c})$  в интегральном виде [24]:

$$E(u, v; \mathbf{c}) = R \int_{-y_{\max}}^{y_{\max}} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} T(\varphi, y; \mathbf{c}) \times E'(\varphi, y) \delta(\mathbf{u} - \mathbf{u}(\varphi, y; \mathbf{c})) d\varphi dy. \quad (4)$$

Для численных расчётов заменим в (3) дельта-функцию Дирака гауссовой функцией

$$\delta_{\sigma}(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{2\sigma^2}\right)$$

и получим следующее приближенное выражение для освещённости:

$$E(u, v; \mathbf{c}) \approx \int_{-y_{\max}}^{y_{\max}} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} RT(\varphi, y; \mathbf{c}) \times E'(\varphi, y) \delta_{\sigma}(\mathbf{u} - \mathbf{u}(\varphi, y; \mathbf{c})) d\varphi dy \quad (5)$$

#### Примеры расчёта оптических элементов

Описанный выше метод расчёта внешней поверхности оптического элемента был реализован в среде программирования Matlab®. Преломляющая поверхность  $r(\varphi, y; \mathbf{c})$  была представлена в виде бикубического сплайна [25]. В этом случае вектор параметров представляет собой набор значений функции радиус-вектора, её первых и смешанной производных в узлах сплайновой сетки. Для оптимизации параметров преломляющей поверхности применялся градиентный метод Бройдена-Флетчера-Голдфарба-Шанно [26]. В качестве функции невязки (1) использовалось относительное среднеквадратичное отклонение (ОСКО) формируемого распределения освещённости от заданного. Вычисление градиента функции невязки (1) производилось аналогично [20].

На рис. 3 изображён рассчитанный оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещённости в прямоугольнике со сторонами 17 м × 4 м на расстоянии 3 м от ламбертовского источника излучения. Такой оптический элемент может быть использован для освещения вытянутого холла или коридора. Угловые размеры освещаемой области составляют 140° × 67°. Размеры оптического элемента равны 58 × 21 × 20 мм вдоль осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно. Время расчёта составило около 24 минут на компьютере с процессором Intel® Core™ 2 Quad Q9400. На рис. 4 изображено распределение освещённости в выходной плоскости, рассчитанное с помощью коммерческого программного обеспечения TracePro® [27] от компании Lambda Research Corporation. Световая эффективность (доля светового потока источника, попавшая в освещаемую область) рассчитанного оптического элемента составляет более 83%. Относительное среднеквадратичное отклонение (ОСКО) формируемого распределения освещённости от равномерного распределения освещённости не превышает 9%. Необходимо заметить, что программное обеспечение TracePro® не по-

зволяет производить расчёт преломляющих поверхностей и используется в данной работе только для проверки работоспособности рассчитанных оптических элементов.

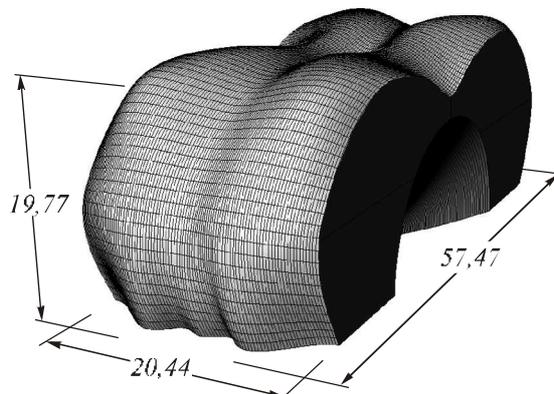


Рис. 3. Оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещённости в прямоугольнике 17 м × 4 м

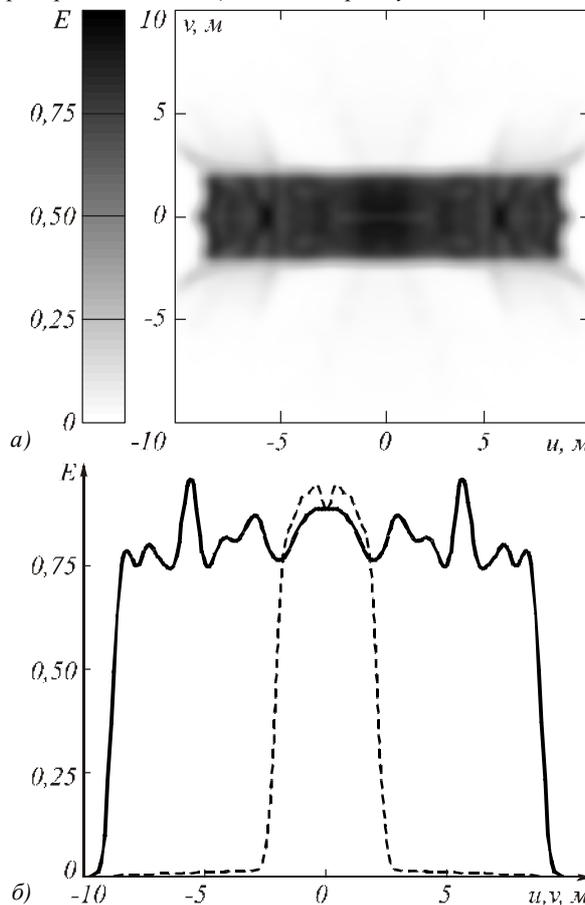


Рис. 4. Распределение освещённости в выходной плоскости от оптического элемента на рис. 3:

- а) полутоновое распределение;  
б) сечения распределения освещённости: непрерывная линия -  $v = 0$ , штриховая линия -  $u = 0$

Для сравнения рассмотрим оптический элемент, имеющий единственную преломляющую рабочую поверхность и формирующий равномерное распределение освещённости с теми же параметрами, что и в предыдущем случае. На рис. 5 изображён такой

оптический элемент, рассчитанный с помощью метода [20]. Размеры оптического элемента составляют  $55 \times 30 \times 18$  мм вдоль осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно.

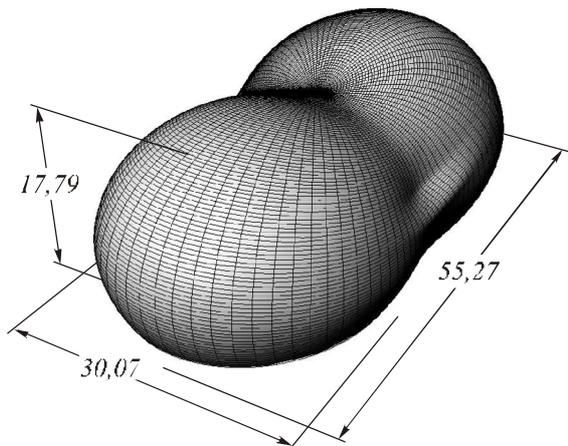


Рис. 5. Оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещённости в прямоугольнике  $17 \times 4$  м и имеющий одну рабочую преломляющую поверхность

На рис. 6 изображено распределение освещённости от этого элемента, полученное с помощью программного обеспечения TracePro®.

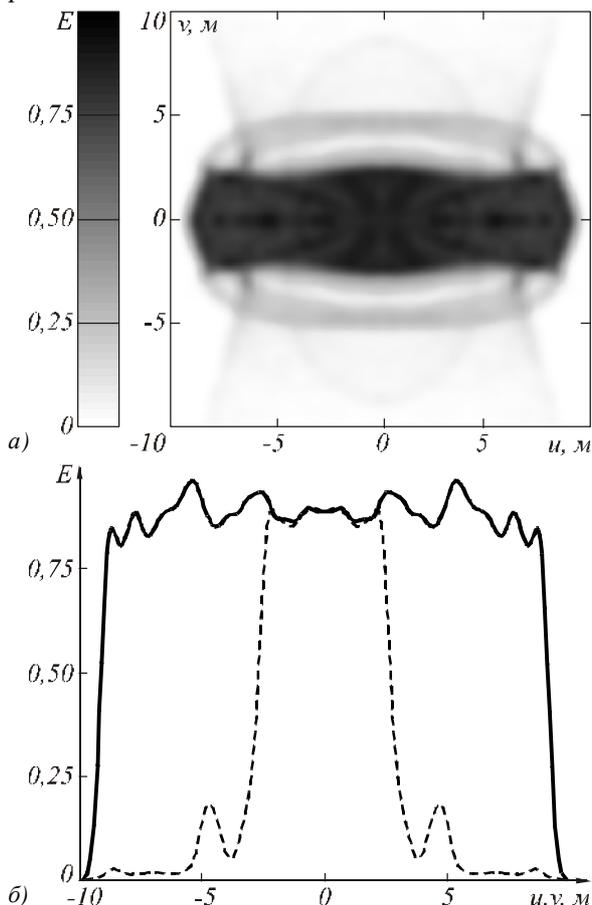


Рис. 6. Распределение освещённости в выходной плоскости от оптического элемента на рис. 5: а) полутоновое распределение; б) сечения распределения освещённости: непрерывная линия -  $v = 0$ , штриховая линия -  $u = 0$

В связи с ограниченными возможностями рефракционной поверхности при повороте лучей и небольшим поперечным угловым размером освещаемой области световая эффективность оптического элемента составляет менее 60 %. ОСКО формируемого распределения освещённости равно 6,7 %. Сравнение рис. 4 и рис. 6 показывает, что при формировании распределений освещённости в прямоугольных областях с большим соотношением сторон и небольшим угловым поперечным размером метод [20] не позволяет достичь той световой эффективности, которую обеспечивает метод, представленный в данной работе.

На практике часто возникает задача формирования распределения освещённости в смещённой прямоугольной области. Примером может быть расчёт настенных светотехнических устройств, освещающих коридор или длинную комнату, фонарей уличного освещения, расположенных у края дорожного полотна и т.д. На рис. 7 изображён оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещённости в смещённом прямоугольнике с размерами  $17 \times 2$  м от ламбертовского источника излучения.

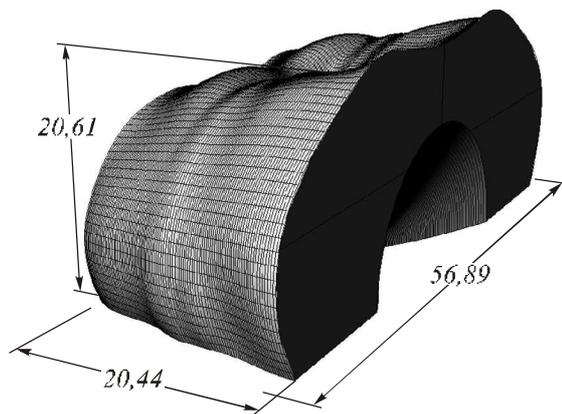


Рис. 7. Оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещённости в смещённом прямоугольнике с размерами  $17 \times 2$  м

Расстояние между источником и выходной плоскостью 3 м. Центр освещаемой области лежит не на оси  $Oz$ , как в предыдущем примере, а смещён на 1 м по оси  $y$ . Размеры рассчитанного оптического элемента равны  $57 \times 21 \times 21$  мм вдоль осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно. Такой оптический элемент, как и в предыдущем примере, может быть использован для освещения длинных коридоров. Время расчёта составило менее полутора часов. На рис. 8 изображено распределение освещённости в выходной плоскости, рассчитанное с помощью программного обеспечения TracePro®. Световая эффективность оптического элемента составляет более 85 %, а ОСКО формируемого распределения освещённости равно 7,9 %.

Необходимо заметить, что оптические элементы с единственной рабочей рефракционной поверхностью (рис. 5) не могут обеспечить световую эффективность выше 50 % при формировании смещённых распределений освещённости, аналогичных рис. 8. В этом слу-

чае использование рассмотренной в данной работе конструкции оптического элемента может позволить увеличить световую эффективность на 30-40 %.

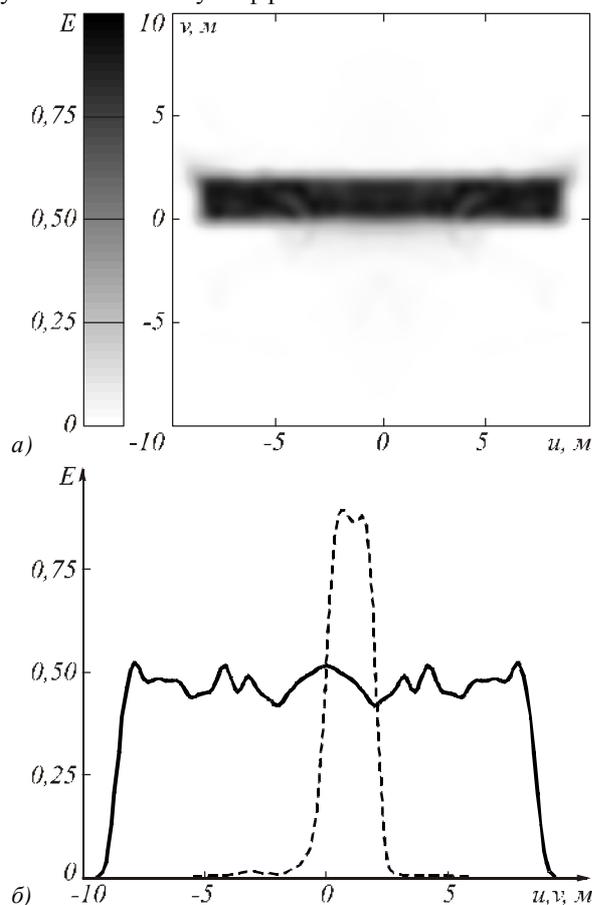


Рис. 8. Распределение освещённости в выходной плоскости от оптического элемента на рис. 7: а) полутоновое распределение; б) сечения распределения освещённости: непрерывная линия -  $v=0$ , штриховая линия -  $u=0$

Рассмотренные примеры показывают, что представленный метод расчёта оптических элементов является эффективным при решении задач освещения вытянутых областей, имеющих поперечный угловой размер менее  $70^\circ$ .

### Заключение

В работе представлен метод расчёта преломляющих оптических элементов, формирующих с высокой световой эффективностью заданные распределения освещённости в вытянутых прямоугольных областях с небольшими поперечными угловыми размерами. Рассчитаны два оптических элемента, формирующих равномерные распределения освещённости в прямоугольниках с размерами  $17 \text{ м} \times 4 \text{ м}$  и  $17 \text{ м} \times 2 \text{ м}$ . Угловые размеры освещаемых областей составляют  $140^\circ \times 67^\circ$  и  $140^\circ \times 34^\circ$  соответственно. Световая эффективность рассчитанных оптических элементов превышает 83 %, а ОСКО формируемых распределений освещённости составляет менее 9 %. При указанных размерах освещаемых областей

предложенный метод обеспечивает увеличение световой эффективности более, чем на 20 % по сравнению с оптическими элементами, имеющими единственную рабочую преломляющую поверхность.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ 09-07-12147-офи\_м, 10-02-90716-моб\_ст) и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-7414.2010.9.

### Литература

1. Pengfei, P. On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / P. Pengfei, W. Xu-Jia // J. Differential Geom. – 1998. – Vol. 48(2). – P. 205-223.
2. Knowles, I. Radially symmetric solutions of a Monge-Ampere equation arising in the reflector mapping problem / I. Knowles [et al.] // Proceedings of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math, 1987. – P. 361-374.
3. Oliker, V.I. Radially symmetric solutions of a Monge-Ampere equation arising in the reflector mapping problem / V.I. Oliker [et al.] // Proceedings of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math, 1987. – P. 361-374.
4. Elmer, W.B. Optical design of reflectors. P. 2 / W.B. Elmer // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17(7). – P. 977-979.
5. Elmer, W.B. The Optical Design of Reflectors / W.B. Elmer. – N.Y.: Wiley, 1980. – 290 p.
6. Kusch, O. Computer-aided optical design of illumination and irradiating devices / O. Kusch. – Moscow: "ASLAN" Publishing House, 1993. – 192 p.
7. Hicks, R.A. Designing a mirror to realize a given projection / R.A. Hicks // J. Opt. Soc. Am. A. – 2005. – Vol. 22(2). – P. 323-330.
8. Досколович, Л.Л. Расчёт формы поверхности зеркал для формирования изображения в виде линии / Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // Оптический журнал. – 2005. – Т. 72, № 4. – С. 34-37.
9. Doskolovich, L.L. Designing a mirror to form a lineshaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S. Bernard // J. Mod. Opt., – 2007. – Vol. 54(4). – P. 589-597.
10. Моисеев, М.А. Расчёт радиально-симметричных преломляющих поверхностей с учётом френелевских потерь / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 1. – С. 201-203.
11. Bortz, J. Optimal design of a nonimaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target / J. Bortz, N. Shatz, D. Pitou // Proc. SPIE. – 2000. – Vol. 4092. – P. 130-138.
12. Muschaweck, J. Tailoring freeform lenses for illumination / J. Muschaweck, H. Ries // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4442. – P. 43-50.
13. Muschaweck, J. Tailored freeform optical surfaces / J. Muschaweck, H. Ries // J. Opt. Soc. Am. A. – 2002. – Vol. 19(3). – P. 590-595.
14. Jacobson, B.A. Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source / B.A. Jacobson, R.D. Gendebach // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4446. – P. 130-138.
15. Parkyn, B. Free-form illumination lens designed by a pseudo-rectangular lawn-mower algorithm / B. Parkyn, D. Pelka // Proc. SPIE. – 2006. – Vol. 6338.
16. Белоусов, А.А. Градиентный метод решения задачи фокусировки в двумерную область при протяжённом

- источнике / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 3. – С. 20-26.
17. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчёта эйконала для фокусировки в заданную область / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // Автометрия. – 2007. – № 1. – С. 98-106.
  18. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчёта оптических элементов для формирования заданной освещённости на криволинейной поверхности / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75, № 3. – С. 30–35.
  19. **Yi, D.** Freeform LED lens for uniform illumination / D. Yi, G. Pei-fu, L. Xu, Zh. Zhen-rong // Optics Express. – 2008. – Vol. 16(17). – P. 12958–12966.
  20. **Досколович, Л.Л.** Градиентный расчёт преломляющей сплайн-поверхности из условия формирования заданного распределения освещённости / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 37-42.
  21. **Досколович, Л.Л.** Расчёт преломляющего оптического элемента для формирования заданного распределения освещённости при протяжённом источнике излучения / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 194-200.
  22. **Досколович, Л.Л.** Расчёт преломляющего оптического элемента, формирующего диаграмму направленности в виде отрезка / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 4. – С. 366-369.
  23. **Досколович, Л.Л.** Расчёт преломляющих оптических элементов для формирования диаграммы направленности в виде прямоугольника / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 7. – С. 70-76.
  24. **Ершова, В.В.** Импульсные функции. Функции комплексной переменной. Операционное исчисление / В.В. Ершова - Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 255 с.
  25. **Boor, C. De** A Practical Guide to Splines / Carl De Boor – N.Y.: Springer, 2001. – 346 p.
  26. **Bonnans, J.-F.** Numerical optimization, theoretical and numerical aspects (Secondary Edition) / J.-F. Bonnans [et al.] - N.Y.: Springer, 2006. – 490 p.
  27. [http://www.lambdare.com/software\\_products/tracepro/](http://www.lambdare.com/software_products/tracepro/)

### References

1. **Pengfei, P.** On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / P. Pengfei, W. Xu-Jia // J. Differential Geom. – 1998. – Vol. 48(2). – P. 205-223.
2. **Knowles, I.** Radially symmetric solutions of a Monge-Ampere equation arising in the reflector mapping problem / I. Knowles [et al.] // Proceedings of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math, 1987. – P. 361-374.
3. **Oliker, V.I.** Geometry and Nonlinear Partial Differential Equations / V.I. Oliker, A. Treibergs. – AMS Bookstore, 1992. – P. 154.
4. **Elmer, W.B.** Optical design of reflectors. P. 2 / W.B. Elmer // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17(7). – P. 977–979.
5. **Elmer, W.B.** The Optical Design of Reflectors / W.B. Elmer. – N.Y.: Wiley, 1980. – 290 p.
6. **Kusch, O.** Computer-aided optical design of illumination and irradiating devices / O. Kusch – Moscow: “ASLAN” Publishing House, 1993. – 192 p.
7. **Hicks, R.A.** Designing a mirror to realize a given projection / R.A. Hicks // J. Opt. Soc. Am. A. – 2005. – Vol. 22(2). – P. 323-330.
8. **Doskolovich, L.L.** Calculating the surface shape of mirrors for shaping an image in the form of a line / L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov // J. Opt. Tech. – 2005. – Vol. 72(4). – P. 318-321. – (in Russian).
9. **Doskolovich, L.L.** Designing a mirror to form a lineshaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S. Bernard // J. Mod. Opt. – 2007. – Vol. 54(4). – P. 589-597.
10. **Doskolovich, L.L.** Designing radially symmetric refractive surfaces with regard for Fresnel losses / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // Computer Optics. – 2008. – Vol. 32(1). – P. 201-203. – (in Russian).
11. **Bortz, J.** Optimal design of a nonimaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target / J. Bortz, N. Shatz, D. Pitou // Proc. SPIE. – 2000. – Vol. 4092. – P. 130-138.
12. **Ries, H.** Tailoring freeform lenses for illumination / H. Ries, J. Muschaweck // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4442. – P. 43-50.
13. **Ries, H.** Tailored freeform optical surfaces / H. Ries, J. Muschaweck, // J. Opt. Soc. Am. A. – 2002. – Vol. 19(3). – P. 590-595.
14. **Jacobson, B.A.** Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source / B.A. Jacobson, R.D. Gendelbach // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4446. – P. 130-138.
15. **Parkyn, B.** Free-form illumination lens designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm / B. Parkyn, D. Pelka // Proc. SPIE. – 2006. – Vol. 6338.
16. **Belousov, A.A.** A gradient method for solving problem of focusing light from extended source to the 2D region / A.A. Belousov, L.L. Doskolovich // Computer Optics. – 2007. – Vol. 31(3). – P. 20-26. – (in Russian).
17. **Belousov, A.A.** A gradient method of eikonal calculating for focusing in the prescribed region / A.A. Belousov, L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov // Avtometriya. – 2007. – Vol. 1. – P. 98-106. – (in Russian).
18. **Belousov, A.A.** A gradient method of designing optical elements for forming a specified irradiance on a curved surface / A.A. Belousov, L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov // J. Opt. Tech. – 2008. – Vol. 75(3). – P. 161-165. – (in Russian).
19. **Yi, D.** Freeform LED lens for uniform illumination / D. Yi, G. Pei-fu, L. Xu, Zh. Zhen-rong // Optics Express. – 2008. – Vol. 16(17). – P. 12958-12966.
20. **Moiseev, M.A.** Gradient computation of refracting spline-surface on condition of producing of required irradiance distribution / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich // Computer Optics. – 2009. – Vol. 33(1). – P. 37-42. – (in Russian).
21. **Moiseev, M.A.** Computation of refracting optical element producing required irradiance distribution for extended light source / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich // Computer Optics. – 2010. – Vol. 34(2). – P. 194-200. – (in Russian).
22. **Moiseev, M.A.** Computation of refractive optical element producing line-shaped directivity diagram / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich // Computer Optics. – 2008. – Vol. 32(4). – P. 366-369. – (in Russian).
23. **Moiseev, M.A.** Calculations for refracting optical elements for forming directional patterns in the form of a rectangle / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich // J. of Opt. Tech., – 2009. – Vol. 76(7). – P. 430-434. – (in Russian).
24. **Ershova, V.V.** Impulse functions. Functions of complex variable. Operator calculus / V.V. Ershova. – Minsk: “Vysheshajaja shkola” Publisher, 1976. – 255 p. – (in Russian).
25. **Boor, C. De** A Practical Guide to Splines / Carl De Boor. – N.Y.: Springer, 2001. – 346 p.
26. **Bonnans, J.-F.** Numerical optimization, theoretical and numerical aspects (Secondary Edition) / J.-F. Bonnans [et al.] - N.Y.: Springer, 2006. – 490 p.
27. [http://www.lambdare.com/software\\_products/tracepro/](http://www.lambdare.com/software_products/tracepro/)

## DESIGN OF REFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS PRODUCING REQUIRED IRRADIANCE DISTRIBUTION IN THE RECTANGULAR AREA WITH BIG ASPECT RATIO

*L.L. Doskolovich<sup>1,2</sup>, M.A. Moiseev<sup>1,2</sup>, A.Kh. Sultanov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Image Processing Systems Institute of the RAS,*

<sup>2</sup> *S.P. Korolyov Samara State Aerospace University,*

<sup>3</sup> *Ufa State Aviation Technical University*

### Abstract

Optical element design containing two groups of optical surfaces is presented. The first group produces cylindrical beam from the light source spherical beam. The second one generates required irradiance distribution from incident cylindrical beam. The method for optical elements design to generate required irradiance distribution is presented. Two optical elements producing uniform irradiance distribution in rectangular regions with sizes  $17 \times 4$  meters and  $17 \times 2$  meters are computed. Energy efficiency of computed optical elements exceeds 83 % and non-uniformity of generated irradiance distribution is less than 9 %.

**Key words:** design of optical elements, irradiance distribution, light emitting diode, total internal reflection, collimating.

### Сведения об авторах



**Досколович Леонид Леонидович**, 1966 года рождения, в 1989 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2001 год), профессор, работает ведущим научным сотрудником лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Специалист в области дифракционной оптики, лазерных информационных технологий, нанопотоники.

**E-mail:** [leonid@smr.ru](mailto:leonid@smr.ru)

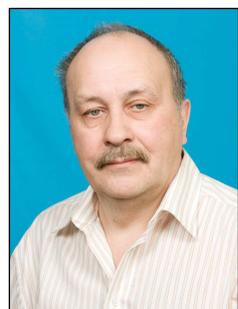
**Leonid Leonidovich Doskolovich** (b. 1966) graduated with honours (1989) from the S. P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU)), majoring in Applied Mathematics. He received his Doctor in Physics & Maths (2001) degrees from Samara State Aerospace University. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS, professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. Current research interests include diffractive optics, laser information technologies, nanophotonics.



**Моисеев Михаил Александрович**, 1986 года рождения, в 2008 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва по специальности «Прикладная математика и физика». Работает инженером НИЛ-35 Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва, стажёр-исследователь Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: обратные задачи расчёта светотехнических устройств.

**E-mail:** [mikhail@smr.ru](mailto:mikhail@smr.ru)

**Mikhail Alexandrovich Moiseev** (b. 1986) graduated with honours (1989) from the S. P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU)), majoring in Applied Mathematics and Physics. Engineer of NIL-35 of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov, probationer-researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Current research interests include nonimaging optics design.



**Султанов Альберт Ханович**, 1950 года рождения, в 1973 году окончил Новосибирский электротехнический институт связи. Доктор технических наук (1996 год), профессор, работает заведующим кафедрой «телекоммуникационных систем» в Уфимском государственном авиационном техническом университете. Специалист в области телекоммуникаций, инфокоммуникационных технологий, оптических систем связи, космических и наземных станций приёма и передачи данных, микроспутниковой связи.

**E-mail:** [tks@ugatu.ac.ru](mailto:tks@ugatu.ac.ru)

**Albert Khanovich Sultanov** (b. 1950) graduated (1973) from the Novosibirsk Electrotechnical Institute of Telecommunications. He received his Doctor in Physics & Maths (1996) degrees from Ufa State Aviation Technical University. Chairman of Telecommunication Systems sub-department at Ufa State Aviation Technical University. Current research interests include telecommunications, infocommunication technologies, optical communication systems, space and earth ground stations for transceiving data, microsatellite communications.

*Поступила в редакцию 21 октября 2010 г.*