

на правах рукописи

**БЕЛОУСОВ Александр Александрович**

**ГЕОМЕТРООПТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ  
ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАНЫХ ДВУМЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ  
ОСВЕЩЕННОСТИ**

Специальность 01.04.05 – Оптика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**САМАРА - 2008**

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» и Институте систем обработки изображений РАН

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
доцент Досколович Леонид Леонидович

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук  
профессор Степанов Сергей Алексеевич,  
  
кандидат физико-математических наук  
доцент Курушина Светлана Евгеньевна

**Ведущая организация:** Самарский государственный университет

Защита состоится «13» июня 2008 г. в 12 00 на заседании диссертационного совета Д.212.215.01 при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева».

Автореферат разослан 12 мая 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
профессор

В.Г. Шахов

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа посвящена разработке градиентных методов расчета преломляющих оптических поверхностей и зеркал в приближении геометрической оптики для формирования требуемых двумерных распределений освещенности и диаграмм направленности излучения.

**Актуальность работы.** Задача расчета оптических поверхностей для формирования заданных двумерных распределений освещенности актуальна для большого числа задач, включающих расчет светотехнических устройств, расчет лазерных систем фокусировки, систем навигации и управления, систем безопасности, аварийного, жилого и промышленного освещения и т.д.

Задача расчета преломляющей или зеркальной поверхности для формирования требуемого распределения освещенности или диаграммы направленности (ДН) излучения является обратной задачей. В приближении геометрической оптики обратная задача формирования заданного распределения освещенности или ДН сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения типа уравнения Монжа-Ампера и является крайне сложной (V. Oliker, 2004). Аналитические решения данного уравнения известны только для случаев радиальной и цилиндрической симметрии.

Ряд методов решения задач данного класса разработан для фокусаторов лазерного излучения (Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Гончарский А.В., Воронцов М.А., Данилов В.А., Кинбер Б.Е., Досколович Л.Л., 1982-2004). Фокусаторы – фокусирующие дифракционные оптические элементы (ДОЭ), рассчитываемые в приближении геометрической оптики. В случае фокусировки в однопараметрические области (в линии) получен ряд аналитических решений для случаев фокусировки в простые линии, такие как отрезок, кольцо, полукольцо. В общем случае гладкой линии фокусировки расчет эйконала сводится к решению нелинейного уравнения для функции лучевого соответствия и последующему восстановлению функции эйконала по дифференциалу из уравнения луча. Задача расчета эйконала из условия фокусировки в заданную двумерную область является существенно более сложной. В задаче фокусировки в заданную двумерную область аналитические решения получены только для задач, обладающих радиальной или цилиндрической симметрией. Для фокусировки излучения в двумерные области известен метод согласованных прямоугольников (Голуб М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Харитонов С.И., 1992). Метод является приближенным и хорошо работает, когда область имеет вид уширенной кривой.

Широко используются итерационные методы расчета ДОЭ в рамках скалярной теории дифракции. Эти методы основаны на итерационном алгоритме Герчберга-Секстона (Gerchberg R.W., Saxton W.O., 1972) и его модификациях (Воронцов М.А., Матвеев А.Н., Сивоконь В.П., 1987). Итерационные методы позволяют реализовать фокусировку в сложную область, в том числе в линии и заданные двумерные области.

Расчет ДОЭ в приближениях геометрической оптики и скалярной теории дифракции обычно производится в параксиальном приближении. Восстанов-

ление формы поверхности рельефа ДОЭ по функции эйконала основано на использовании приближенных соотношений типа приближения тонкого оптического элемента. Изменение интенсивности при прохождении через оптический элемент при расчете формы поверхности не учитывается. Использование подобных соотношений недопустимо при расчете зеркальных и преломляющих поверхностей, предназначенных для формирования областей с большим угловым размером (в несколько десятков градусов).

Ряд методов расчета оптических элементов разработан в светотехнике (Elmer W.B. 1985, Welford W.T. и Winston R., 1989). Методы светотехники позволяют учесть размеры и форму источника света, однако аналитические решения и эффективные алгоритмы расчета известны только для задач с цилиндрической и радиальной симметрией.

В последние годы появились публикации по геометрооптическому расчету оптических поверхностей итерационными методами при компактных источниках света (Ries H. и Muschaweck J., 2001-2002, Hicks R.A. 2005, W. G. Chen и С.М. Uang, 2006, R. Winston, J.C. Miñano и P. Benítez, 2004-2006). Указанные методы позволяют сформировать сложные распределения освещенности, например, в виде алфавитно-цифровых символов (Ries H., Muschaweck J., 2002, 2004), однако обладают низкой эффективностью. Низкая эффективность обусловлена тем фактом, что известные алгоритмы позволяют формировать сложные распределения освещенности только на равномерно засвеченном фоне, содержащем более 50% энергии источника света.

Таким образом, в настоящее время в приближении геометрической оптики не разработано эффективных итерационных и градиентных методов расчета оптических поверхностей для формирования заданных двумерных распределений освещенности и ДН излучения.

**Целью диссертации** является разработка градиентных методов расчета оптических поверхностей для формирования требуемых двумерных распределений освещенности и ДН излучения при точечных и протяженных источниках излучения в приближении геометрической оптики.

В соответствии с поставленной целью определены **основные задачи диссертации**:

- Разработка градиентного метода расчета эйконала светового поля, обеспечивающего формирование требуемого распределения освещенности в двумерной области.
- Разработка градиентного метода расчета преломляющих и зеркальных оптических поверхностей для формирования требуемого распределения освещенности в двумерной области при точечных источниках излучения.
- Разработка градиентного метода расчета преломляющих и зеркальных оптических поверхностей для формирования требуемого распределения освещенности в двумерной области при протяженных источниках излучения.

- Разработка программных средств, реализующих разработанные методы и применение методов к расчету оптических поверхностей для формирования заданных двумерных распределений освещенности и ДН.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Разработан градиентный метод расчета эйконала, заданного в виде полинома, для формирования требуемого двумерного распределения освещенности в приближении геометрической оптики. Метод основан на градиентной минимизации функции невязки от коэффициентов полинома, представляющей отличие расчетной и заданной освещенности. Распределение освещенности представлено как интегральный оператор с ядром в виде аппроксимации дельта-функции. Градиент функции невязки вычислен аналитически. Для расчета начального приближения градиентного метода используется метод согласованных прямоугольников.
2. Разработан градиентный метод расчета преломляющих и зеркальных оптических поверхностей для формирования заданных двумерных распределений освещенности при точечных источниках света в приближении геометрической оптики. Метод основан на представлении оптической поверхности через распределение эйконала в виде полинома, заданное в прилегающей плоскости и последующей градиентной минимизации функции невязки, представляющей отличие расчетной и заданной освещенности. Распределение освещенности представлено как интегральный оператор с ядром в виде аппроксимации дельта-функции. Градиент функции невязки вычислен аналитически.
3. Разработан градиентный метод расчета преломляющих и зеркальных оптических поверхностей для формирования заданных двумерных распределений освещенности и ДН излучения при протяженных источниках света в приближении геометрической оптики. Метод основан на представлении оптической поверхности через распределение эйконала в виде полинома, заданное в прилегающей плоскости и последующей градиентной минимизации функции невязки, представляющей отличие расчетной и заданной освещенности (или ДН). Распределение освещенности (ДН) представлено как интегральный оператор с ядром в виде аппроксимации дельта-функции. Градиент функции невязки вычислен аналитически.
4. На основе разработанных градиентных методов создано программное обеспечение и рассчитаны оптические элементы для формирования распределений освещенности в виде прямоугольника, треугольника, отрезка, креста, квадрата и для формирования ДН заданного вида.

**Защищаемые положения:**

1. Градиентный метод расчета эйконала светового поля, обеспечивающего формирование заданного двумерного распределения освещенности.
2. Градиентный метод расчета преломляющих и зеркальных оптических поверхностей для формирования заданного двумерного распределения освещенности при точечных источниках излучения.

3. Градиентный метод расчета преломляющих и зеркальных оптических поверхностей для формирования заданного двумерного распределения освещенности при протяженных источниках излучения.
4. Градиентный метод расчета преломляющих и зеркальных оптических поверхностей для формирования заданной двумерной ДН при протяженных источниках излучения.
5. Результаты применения разработанных градиентных методов для расчета оптических поверхностей для формирования заданных распределений освещенности.

#### **Практическая ценность работы:**

- Градиентные методы, разработанные в диссертационной работе, позволят производить расчет оптических поверхностей, создающих заданные двумерные распределения освещенности и ДН излучения при компактных и протяженных источниках света. Методы обеспечивают низкую среднеквадратическую ошибку формирования требуемых распределений освещенности и ДН излучения при высокой энергетической эффективности. Использование разработанных методов позволяет сократить материальные и временные затраты при расчете светотехнических устройств.
- Представленные градиентные методы могут быть применены при расчете оптических элементов для светодиодов и светотехнических устройств на основе светодиодов. Методы позволят с высокой световой эффективностью формировать заданные распределения освещенности и адаптивно управлять ДН излучения.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: на 3-ей и 5-ой летней школах молодых ученых по дифракционной оптике и обработке изображений (Самарский государственный аэрокосмический университет, 2005, 2007), на 3-ем международном форуме «Голография ЭКСПО-2006» (Москва, сентябрь, 2006), на 5-ой международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2007» (Санкт–Петербург, октябрь 2007).

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ. Из них 4 статьи в журналах рекомендуемых ВАК, 4 тезисов докладов конференций и одно свидетельство о регистрации программного обеспечения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы (119 наименований), приложения, изложенных на 113 страницах и содержит 46 рисунков.

#### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи, сделан обзор научных работ по рассматриваемым вопросам, изложена научная новизна, практическая значимость, защищаемые положения, описаны содержание и структура диссертации.

**В первой главе** рассмотрен градиентный метод расчета функции эйконала светового поля из условия формирования заданного двумерного распределения освещенности.

Пусть  $E_0(\mathbf{u})$ ,  $\mathbf{u} \in G$  - распределение освещенности в плоскости  $z=0$ ,  $G$  - апертура. Необходимо рассчитать распределение эйконала  $\psi(\mathbf{u})$ ,  $\mathbf{u} \in G$ , из условия формирования в области  $D$ , в плоскости  $z=f$ , заданного распределения освещенности  $E(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x} \in D$  (рис. 1).

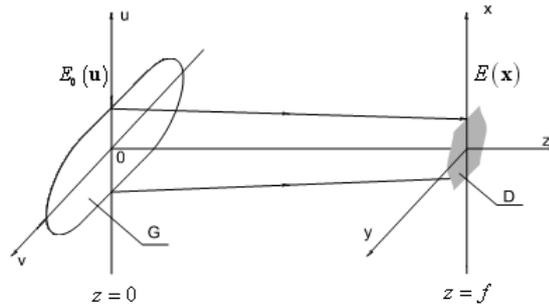


Рис. 1 - Геометрия задачи формирования распределения освещенности в двумерной области

Для освещенности в плоскости  $z=f$  получено следующее выражение

$$E(\mathbf{x}) = \iint_G \delta_\sigma \left( \mathbf{x} - \mathbf{u} - \nabla \psi(\mathbf{u}) f / \sqrt{1 - (\nabla \psi(\mathbf{u}))^2} \right) E_0(\mathbf{u}) d^2 \mathbf{u}, \quad (1)$$

где

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

- аппроксимация дельта-функции в виде гауссовой функции, а

$$\nabla \psi(\mathbf{u}) = \left( \frac{\partial \psi(\mathbf{u})}{\partial u}, \frac{\partial \psi(\mathbf{u})}{\partial v} \right).$$

Для расчета эйконала  $\psi(\mathbf{u})$  предложено использовать градиентный метод минимизации функции ошибки, представляющего отличие расчетного и требуемого распределений освещенности. Эйконал определим в виде полинома двух переменных

$$\psi(u, v) = \sum_{ij} c_{ij} u^i v^j. \quad (3)$$

В качестве функции ошибки используем квадратичную функцию

$$\varepsilon(\mathbf{c}) = \iint_D (E(\mathbf{x}; \mathbf{c}) - E(\mathbf{x}))^2 dx dy, \quad (4)$$

где  $\mathbf{c}$  - вектор коэффициентов полинома, а  $E(\mathbf{x}; \mathbf{c})$ ,  $E(\mathbf{x})$  - расчетное и требуемое распределения освещенности в области  $D$ . Градиентный расчет функции  $\psi(\mathbf{u})$  состоит в итерационной коррекции вектора коэффициентов по правилу

$$\mathbf{c}_n = \mathbf{c}_{n-1} - t \nabla \varepsilon(\mathbf{c}_{n-1}), \quad (5)$$

где  $\nabla \varepsilon(\mathbf{c})$  - градиент функции невязки,  $t$  – шаг метода. В качестве метода минимизации функции (4) возможно использование различных вариантов градиентных методов. Использование интегрального представления (1) позволяет получить компоненты вектора градиента в (5) в виде

$$\frac{\partial \varepsilon(\mathbf{c})}{\partial c_{ij}} = 2 \iint_D (E(\mathbf{x}; \mathbf{c}) - E(\mathbf{x})) \Psi_{ij}(\mathbf{x}) d^2 \mathbf{x}, \quad (6)$$

где  $\Psi_{ij}(\mathbf{x}) = \iint_G E_0(\mathbf{u}) \frac{\partial}{\partial c_{ij}} \left( \delta_\sigma \left( \mathbf{x} - \mathbf{u} - \nabla \psi(\mathbf{u}) f / \sqrt{1 - (\nabla \psi(\mathbf{u}))^2} \right) \right) d^2 \mathbf{u}$ .

Для характеристики качества получаемых решений, введем значения энергетической эффективности  $e = \int_D E(\mathbf{x}; \mathbf{c}) d^2 \mathbf{x} / \int_G E_0(\mathbf{u}) d^2 \mathbf{u}$  и среднеквадратичной

ошибки  $\chi = \frac{1}{\bar{E}} \left[ \frac{1}{\|D\|} \int_D (E(\mathbf{x}; \mathbf{c}) - E(\mathbf{x}))^2 d^2 \mathbf{x} \right]^{1/2}$ , где  $\|D\|$  - площадь области

наблюдения  $D$ , а  $\bar{E} = \frac{1}{\|D\|} \int_D E(\mathbf{x}; \mathbf{c}) d^2 \mathbf{x}$ .

Для выбора начального приближения для градиентного метода предложено использовать приближенный метод согласованных прямоугольников. Найденная по методу согласованных прямоугольников функция эйконала, аппроксимируется полиномом (3) и далее используется в качестве начального приближения для градиентного метода.

На рис. 2 представлено рассчитанное градиентным методом распределение эйконала и формируемое при нем распределение освещенности в прямоугольной области с размерами 70мм на 50мм. Освещенность  $E_0(\mathbf{u})$  в пределах круглой апертуры радиуса  $R=2$  мм предполагалась постоянной.

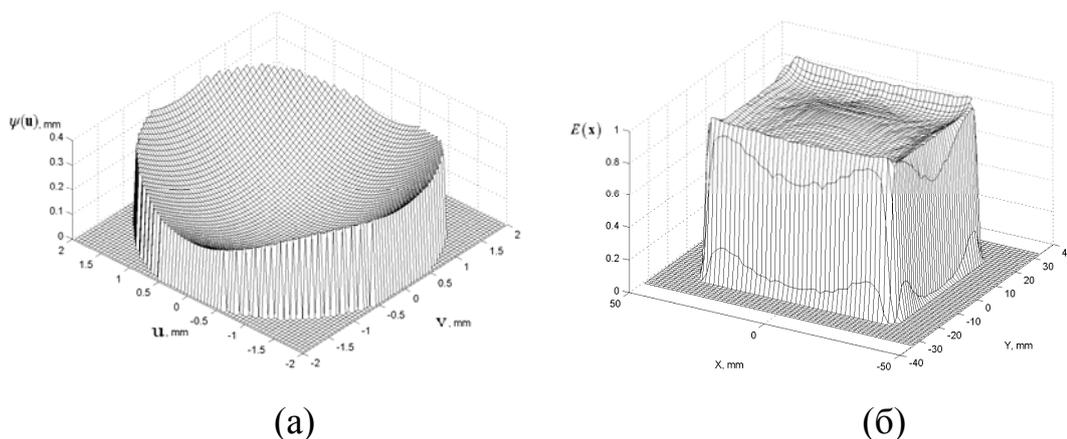


Рис. 2 - а) Распределение эйконала в круглой области  $G$  с радиусом  $R=2$  мм для формирования равномерной освещенности в прямоугольной области, б) расчетное распределение освещенности в плоскости  $z=115$  мм

Энергетическая эффективность формирования составляет  $e=99.97\%$  при среднеквадратичной ошибке  $\chi=5.72\%$ .

На рис. 3 представлен график изменения значений функции ошибки от числа итераций градиентного метода. За 16 итераций ошибка уменьшилась почти на порядок. Такая зависимость ошибки от числа итераций типична для рассмотренного градиентного метода и имеет аналогичный вид во всех последующих примерах.

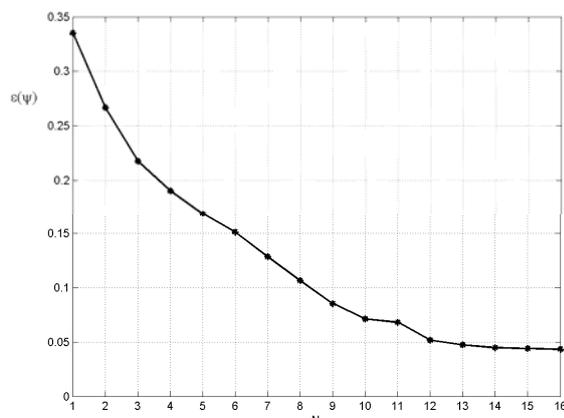


Рис. 3 - График изменения величины ошибки  $\varepsilon(\psi)$  от числа итераций  $N$

На рис. 4а представлено рассчитанное градиентным методом несимметричное распределение эйконала для формирования равномерного распределения освещенности в несимметричной треугольной области (рис.4б). Размеры сторон треугольника составляют 50 мм, 56 мм и 56 мм. Освещенность  $E_0(\mathbf{u})$  в пределах апертуры задавалась в форме гауссовой функции.

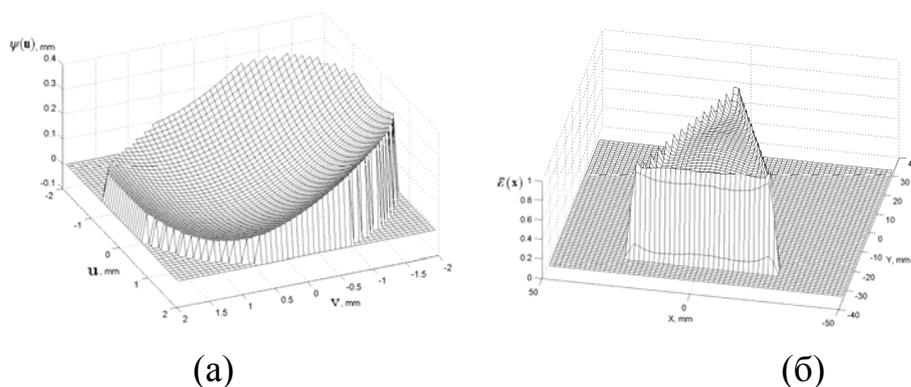


Рис. 4 - а) Распределение эйконала в круглой области  $G$  с радиусом  $R=1.5$  мм для формирования равномерной освещенности в треугольной области, б) расчетное распределение освещенности в плоскости  $z=115$  мм

Энергетическая эффективность формирования треугольного распределения составляет  $\varepsilon=99.1\%$  при среднеквадратичной ошибке  $\chi=9.42\%$ .

Предложенный метод расчета эйконала может быть непосредственно применен для расчета ДОЭ, зеркал и преломляющих поверхностей в случае, когда можно пренебречь изменением освещенности входного пучка при прохождении через оптический элемент.

**Во второй главе** представлен градиентный метод расчета оптических поверхностей для формирования заданных двумерных распределений освещенности при точечных источниках света.

Требуется рассчитать форму преломляющей или зеркальной поверхности  $\mathbf{M}(\mathbf{u}) = (x(\mathbf{u}), y(\mathbf{u}), z(\mathbf{u}))$ , из условия формирования в плоскости  $z = f$  заданного распределения освещенности  $E(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x} \in D$  при точечном источнике излучения в точке  $O = (O_x, O_y, O_z)$  (рис. 5).

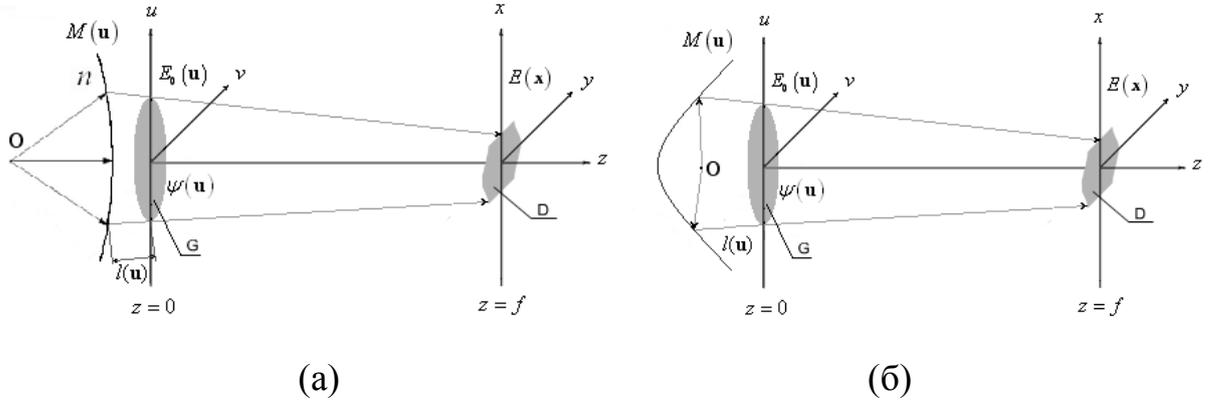


Рис. 5 - Геометрия преломляющего (а), зеркального (б) оптического элемента, формирующего эйконал в плоской области при точечном источнике

Метод расчета оптической поверхности  $\mathbf{M}(\mathbf{u})$  при точечном источнике излучения основан на представлении его поверхности через функцию эйконала поля  $\psi(\mathbf{u})$ ,  $\mathbf{u} \in G$  в прилегающей плоскости. Без ограничения общности, эйконал поля будем считать заданным в плоскости  $z=0$ . При заданном эйконале оптическая поверхность определяется по формуле

$$\mathbf{M}(\mathbf{u}) = \mathbf{r}(\mathbf{u}) - \mathbf{p}(\mathbf{u})l(\mathbf{u}), \quad (7)$$

где  $\mathbf{r}(\mathbf{u}) = (u, v, 0)$  - радиус вектор точки в плоскости  $z=0$ ,  $\mathbf{p}(\mathbf{u}) = \left( \nabla \psi(\mathbf{u}), \sqrt{1 - (\nabla \psi(\mathbf{u}))^2} \right)$  - единичный вектор луча,  $l(\mathbf{u})$  - расстояние от точки поверхности до плоскости эйконала по направлению  $\mathbf{p}(\mathbf{u})$ . В случае отражающей поверхности  $l(\mathbf{u})$  имеет вид

$$l(\mathbf{u}) = \frac{\psi^2(\mathbf{u}) - |\mathbf{r}(\mathbf{u}) - \mathbf{O}|^2}{2(\psi(\mathbf{u}) - (\mathbf{r}(\mathbf{u}) - \mathbf{O}, \mathbf{p}(\mathbf{u})))}. \quad (8)$$

В случае преломляющей поверхности  $l(\mathbf{u})$  определяется из квадратного уравнения

$$|\mathbf{r}(\mathbf{u}) - \mathbf{O}|^2 - 2(\mathbf{r}(\mathbf{u}) - \mathbf{O}, \mathbf{p}(\mathbf{u}))l(\mathbf{u}) + l^2(\mathbf{u}) = \psi^2(\mathbf{u}) - 2\psi(\mathbf{u})l(\mathbf{u}) + l^2(\mathbf{u}). \quad (9)$$

При оптической поверхности (7), распределение освещенности в плоскости  $z = f$  может быть представлено в виде

$$E(\mathbf{x}) = \iint_G \delta_\sigma \left( \mathbf{x} - \mathbf{u} - \nabla \psi(\mathbf{u}) f / \sqrt{1 - (\nabla \psi(\mathbf{u}))^2} \right) I(\mathbf{u}) \frac{(\mathbf{O}\mathbf{M}(\mathbf{u}), \mathbf{N}(\mathbf{u}))}{|\mathbf{O}\mathbf{M}(\mathbf{u})|^3} d^2\mathbf{u}, \quad (10)$$

где  $\delta_\sigma$  аппроксимация дельта-функции (2),  $I(\mathbf{u})$  - интенсивность точечного источника,  $\mathbf{N}(\mathbf{u}) = \left( \frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{u})}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{M}(\mathbf{u})}{\partial v} \right)$  - вектор нормали к поверхности.

Для реализации градиентного метода определим эйконал в виде полинома двух переменных (3) и введем функцию ошибки (4). При этом задача расчета оптической поверхности сводится к градиентной минимизации функции ошибки (4) по правилу (5). Компоненты вектора-градиента в случае расчета оптической поверхности для точечного источника излучения были получены в виде

$$\frac{\partial \varepsilon(\mathbf{c})}{\partial c_{ij}} = 2 \iint_D (E(\mathbf{x}; \mathbf{c}) - E(\mathbf{x})) \Psi_{ij}(\mathbf{x}) d^2 \mathbf{x}, \quad (11)$$

$$\Psi_{ij}(\mathbf{x}) = \iint_G \frac{\partial}{\partial c_{ij}} \left( \delta_\sigma \left( \mathbf{x} - \mathbf{u} - \nabla \psi(\mathbf{u}) f / \sqrt{1 - (\nabla \psi(\mathbf{u}))^2} \right) I(\mathbf{u}) \frac{(\mathbf{OM}(\mathbf{u}), \mathbf{N}(\mathbf{u}))}{|\mathbf{OM}(\mathbf{u})|^3} \right) d^2 \mathbf{u}$$

Представление оптической поверхности через эйконал в прилегающей плоскости позволяет использовать для расчета начального приближения оптической поверхности градиентный метод расчета эйконала главы 1.

На рис. 6а представлена преломляющая поверхность ( $n=1.5$ ), рассчитанная для формирования равномерной освещенности в прямоугольной области с размерами 70 мм на 50 мм при точечном ламбертовском источнике света в точке  $O=(0,0,-5)$  мм. Для расчета поверхности было выполнено 17 итераций градиентного метода. За 17 итераций ошибка уменьшилась на порядок. Такое уменьшение ошибки для 15-20 итераций типично для рассмотренного метода и имеет аналогичный вид в последующих примерах. На рис. 6б представлен результат моделирования рассчитанной поверхности в коммерческой программе по светотехнике TracePro. Энергетическая эффективность составляет  $\epsilon=99.9\%$  при среднеквадратичной ошибке  $\chi=5.9\%$ . Здесь и далее энергетическая эффективность определяется как отношение светового потока в заданном прямоугольнике к полному световому потоку в области наблюдения  $z=f$ .

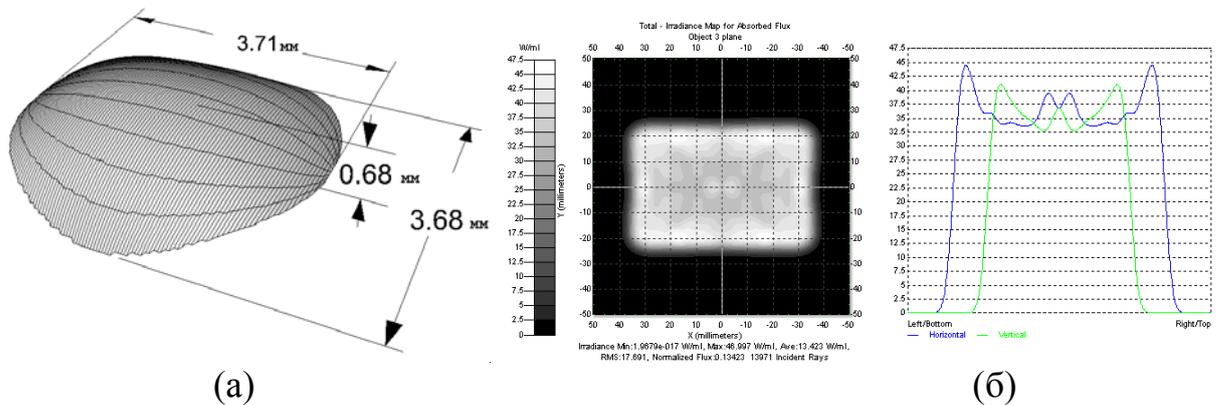


Рис. 6 - а) Преломляющая поверхность для формирования равномерной освещенности в прямоугольной области при  $z=115$  мм, б) рассчитанная в TracePro освещенность от преломляющей поверхности ба

Результат моделирования (рис.6б) показывает формирование освещенности в виде равномерного прямоугольника и подтверждает правильность проведенных расчетов.

Разработанный градиентный метод был модифицирован для расчета оптических поверхностей, формирующих заданное распределение освещенности на криволинейных поверхностях. На рис. 7 представлена преломляющая поверхность ( $n=1.5$ ), рассчитанная для формирования распределения освещенности в виде прямоугольника  $60 \times 40$  мм, расположенного на цилиндрической поверхности с радиусом 35 мм. Ось цилиндрической поверхности совпадает с осью  $Oy$  и расположена в плоскости  $z=100$  мм. Ламбертовский источник - в точке  $O=(0,0,-5)$ мм. Энергетическая эффективность составляет  $\epsilon=99.9\%$  при среднеквадратичной ошибке  $\chi=10.2\%$ .

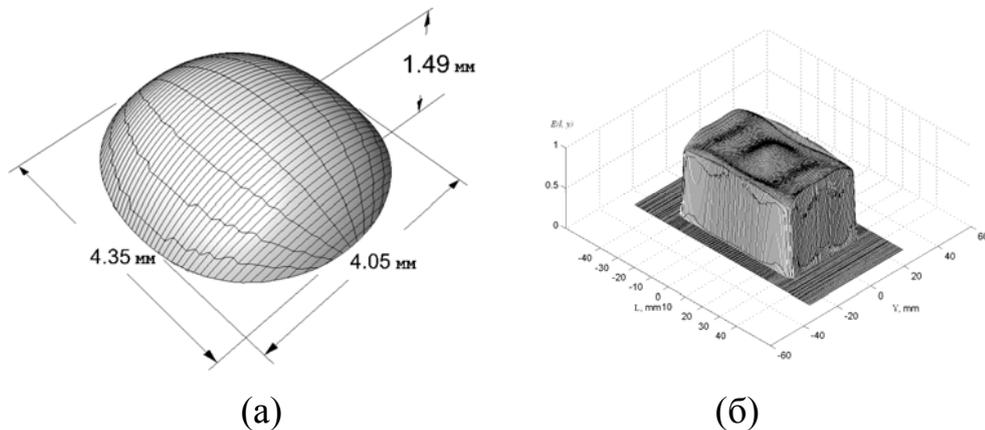


Рис. 7 - а) Преломляющая поверхность для формирования равномерной освещенности в прямоугольной области на цилиндрической поверхности, б) рассчитанная освещенность от преломляющей поверхности 7а

**В третьей главе** представлен градиентный метод расчета оптических поверхностей для формирования заданных двумерных распределений освещенности при протяженных источниках света.

Требуется рассчитать оптическую поверхность  $\mathbf{M}(\mathbf{u}) = (x(\mathbf{u}), y(\mathbf{u}), z(\mathbf{u}))$  из условия формирования заданного распределения освещенности от протяженного источника в области  $D$ , расположенной в плоскости  $z = f$  (рис. 8).

Аппроксимируем протяженный источник набором из  $L$  точечных источников излучения  $\mathbf{u}_{0k}, k = \overline{1, L}$ . В этом случае освещенность  $E(\mathbf{x})$  примет вид

$$E(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^L \iint_G \delta_{\sigma}(\mathbf{x} - \mathbf{x}(\mathbf{u}; \mathbf{u}_{0k})) I(\mathbf{S}_{1z}) \frac{(\mathbf{S}_1(\mathbf{u}; \mathbf{u}_{0k}), \mathbf{N}(\mathbf{u}))}{|\mathbf{S}_1(\mathbf{u}; \mathbf{u}_{0k})|^3} d^2\mathbf{u}, \quad (12)$$

где  $\delta_\sigma$  аппроксимация дельта-функции (2),  $\mathbf{S}_1(\mathbf{u}; \mathbf{u}_{0k})$  - вектор луча, исходящего из точки  $\mathbf{u}_{0k}$  к точке  $\mathbf{M}(\mathbf{u})$ ,  $\mathbf{x}(\mathbf{u}; \mathbf{u}_{0k}) = \mathbf{M}(\mathbf{u}) + \mathbf{S}_2(\mathbf{u}; \mathbf{u}_{0k})l(\mathbf{u}; \mathbf{u}_{0k})$  - вектор пересечения преломленного луча  $\mathbf{S}_2(\mathbf{u}; \mathbf{u}_{0k})$  с плоскостью наблюдения  $z=f$ . Вектор  $\mathbf{S}_2(\mathbf{u}; \mathbf{u}_{0k})$  определяется по закону Снеллиуса.

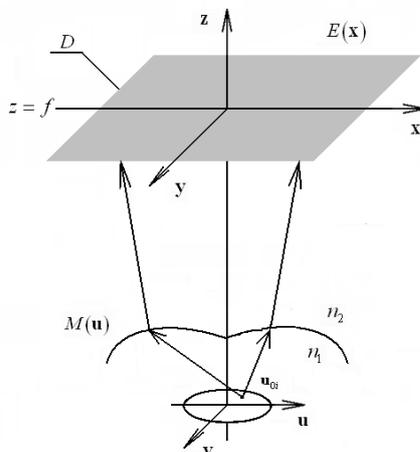


Рис. 8 - Геометрия задачи расчета оптического элемента при протяженном источнике излучения

Рассмотрим точку  $\mathbf{O}$  в центре протяженного источника. Для нее в некоторой плоскости на расстоянии  $z_0$  по оптической оси  $z$  от источника определим эйконал светового поля  $\psi(\mathbf{u})$ ,  $\mathbf{u} \in G$ . Определим поверхность  $\mathbf{M}$  через функцию распределения эйконала  $\psi(\mathbf{u})$  по формулам (7), (9) для преломляющей поверхности и (7), (8) для зеркальной.

Для расчета формы поверхности  $\mathbf{M}(\mathbf{u})$ , формирующей заданное распределение освещенности, используем градиентный метод минимизации функции ошибки (4), где расчетная освещенность имеет вид (12). Эйконал определим в виде полинома (3). При этом задача минимизации функции ошибки (4) сводится к задаче минимизации функции коэффициентов полинома  $c_{ij}$  по правилу (5). Компоненты вектора градиента в (3) были получены в виде

$$\frac{\partial \varepsilon(\mathbf{c})}{\partial c_{ij}} = 2 \iint_D (E(\mathbf{x}; \mathbf{c}) - E(\mathbf{x})) \Psi_{ij}(\mathbf{x}) d^2 \mathbf{x}, \quad (13)$$

$$\text{где } \Psi_{ij}(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^L \iint_G I(\mathbf{S}_{1z}) \frac{\partial}{\partial c_{ij}} \left( \frac{(\mathbf{S}_1(\mathbf{u}; \mathbf{u}_{0k}), \mathbf{N}(\mathbf{u}))}{|\mathbf{S}_1(\mathbf{u}; \mathbf{u}_{0k})|^3} \delta_\sigma(\mathbf{x} - \mathbf{x}(\mathbf{u}; \mathbf{u}_{0k}; \mathbf{c})) \right) d^2 \mathbf{u}.$$

В качестве начального приближения градиентного метода предлагается использовать поверхность, рассчитанную из условия формирования заданной освещенности при точечном источнике излучения.

В главе так же рассмотрен метод расчета оптических поверхностей для формирования заданных двумерных ДН излучения при протяженных источ-

никах света. Метод аналогичен рассмотренному методу расчета поверхностей для формирования заданных распределений освещенности.

Был рассчитан преломляющий элемент для формирования распределения освещенности в виде квадрата со стороной 60 мм в плоскости  $z=30$  мм. Протяженный источник - квадратная площадка со стороной 1 мм, излучающая по закону Ламберта. Расстояние от источника до преломляющего элемента 3 мм. Апертура преломляющего элемента – круглая с радиусом 2,5 мм. Первоначально была рассчитана преломляющая поверхность для точечного источника света. Результат моделирования поверхности при помощи программы TrasePro на рис. 9 а) показывает формирование равномерного квадрата. При использовании протяженного источника распределение освещенности приобретает выраженный неравномерный, размытый характер (рис. 9 б)).

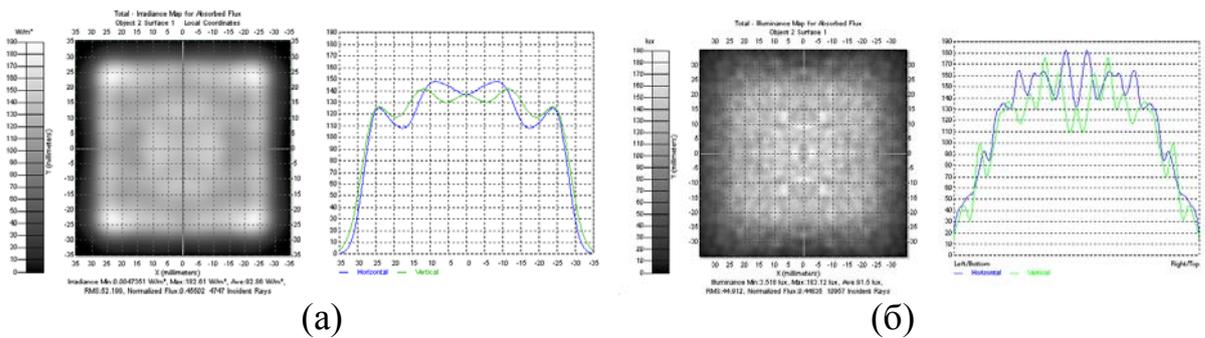


Рис. 9 - а) Рассчитанная в TrasePro освещенность от точечного источника излучения с оптимизированной для него поверхностью,  $e=99.9\%$ ,  $\chi=8.4\%$ , б) рассчитанная освещенность от квадратного источника излучения со стороной 1 мм,  $e=60\%$ ,  $\chi=37,3\%$

Для коррекции полученного решения был использован описанный градиентный метод для протяженных источников света. На рис. 10 представлена рассчитанная поверхность и результат ее моделирования в TrasePro.

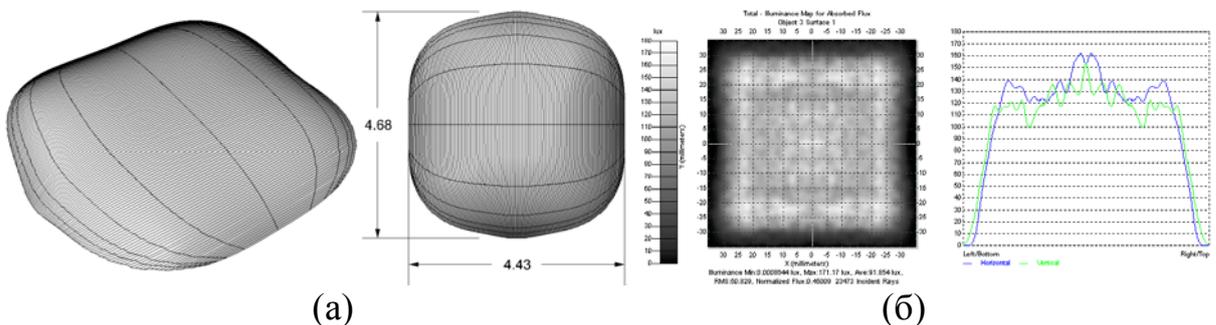


Рис. 10 - а) Преломляющая поверхность для формирования равномерного распределения освещенности в квадрате в плоскости  $z = 30$  мм при квадратном источнике излучения со стороной 1 мм, б) рассчитанная в TrasePro освещенность для полученной преломляющей поверхности,  $e=99\%$ ,  $\chi=13,4\%$

Полученная в последнем случае среднеквадратичная ошибка почти в 3 раза меньше, чем в случае поверхности, рассчитанной для точечного источника.

**В приложении** описана принципиальная схема оптической системы адаптивного управления диаграммой направленности излучения.

### **Заключение.**

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработан градиентный метод расчета функции эйконала из условия формирования заданного двумерного распределения освещенности. Рассчитаны функции эйконала для формирования равномерной освещенности в прямоугольной, треугольной и круглой областях. Метод обеспечивает среднеквадратическую ошибку формирования заданной освещенности 5-10% при энергетической эффективности 99-100%. Метод применен к расчету преломляющих элементов и зеркал.
2. Разработан градиентный метод расчета оптических поверхностей для формирования заданных двумерных распределений освещенности на плоской и криволинейной поверхности при точечных источниках света. Рассчитаны оптические поверхности для формирования равномерных распределений освещенности в виде прямоугольника, треугольника, отрезка. Метод обеспечивает среднеквадратическую ошибку формирования заданной освещенности 3-11% при энергетической эффективности 99-100%.
3. Разработан градиентный метод расчета оптических поверхностей для формирования заданных двумерных распределений освещенности и диаграмм направленности, при протяженных источниках излучения. Рассчитан преломляющий оптический элемент для формирования равномерного распределения освещенности в виде квадрата при протяженном источнике излучения. Рассчитана поверхность зеркала, обеспечивающая формирование заданной двумерной диаграммы направленности излучения.
4. На основе разработанных градиентных методов создано программное обеспечение по расчету оптических поверхностей.

**Основные результаты** опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией:

1. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчет эйконала для фокусировки в заданную область [Текст] / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // «Автометрия». – 2007. - №1. - С. 98-106.
2. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод решения задачи фокусировки в двумерную область при протяженном источнике [Текст] / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович // «Компьютерная оптика». – 2007. – Т. 31.- №3. - С. 20-26.
3. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчета оптических элементов для формирования заданной освещенности на криволинейной поверхности [Текст] / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // «Оптический журнал». – 2008. – Т. 75. - №3. - С. 30-35.
4. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчета преломляющих поверхностей для формирования заданных распределений освещенности [Текст] /

А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // «Автометрия». – 2008. – Т. 44. - №2. - С. 91-99.

в других изданиях:

5. **Белоусов, А.А.** Расчет поверхностей, формирующих заданную диаграмму направленности [Текст] / А.А. Белоусов // 3 летняя школа молодых ученых по дифракционной оптике и обработке изображений: сб. науч. тр. / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. - Самара, 2005. – С. 24-25.
6. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчет ДОО для фокусировки в заданную двумерную область [Текст] / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // Третий Международный форум «Голография ЭКСПО-2006»: сб. науч. тр. / ООО «Голография-Сервис». – Москва, 2006. – С. 63-64.
7. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчета оптических элементов для формирования освещенности на криволинейной поверхности [Текст] / А.А. Белоусов // 5 летняя школа молодых ученых по дифракционной оптике и обработке изображений: сб. науч. тр. / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. - Самара, 2005.
8. **Белоусов, А.А.** Расчет формирующей оптики светодиодов для фокусировки в заданную область [Текст] / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович // Пятая международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2007»: сб. науч. тр. / Оптическое общество им. Д.С. Рождественского, Санкт-Петербургский гос. ун-т информационных технологий, механики и оптики. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 216-217.
9. **Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.** Программа Расчета Оптических Элементов для Формирования Заданных Диаграмм Направленности «ЛайтПаф» [Текст] / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов; заявитель и правообладатель Институт систем обработки изображений РАН. - №2006610602 ; заявл. 14.12.2005 ; опубл. 10.02.2006, Реестр программ для ЭВМ.