

Геометрическое моделирование световых приборов с помощью расширенной триангуляционной сетки

02, февраль 2017

Байнев В. В.^{1,*}, Федосин С. А.^{1,**}

УДК: 628.9:681.7

¹Россия, Саранск, Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва

[*bw14@mail.ru](mailto:bw14@mail.ru)

**fedosinsa@freemail.mrsu.ru

Введение

Проектирование световых приборов (СП) является очень важной и актуальной задачей современной светотехнической промышленности. Это связано с тем, что применение световых приборов с высоким коэффициентом полезного действия позволяет заметно увеличить эффективность светотехнических установок массового использования и понизить при этом их энергопотребление.

Развитие световых приборов в значительной мере определяется совершенствованием и развитием методов их светотехнического расчета. Результаты этого расчета во многом определяют форму и размеры оптической системы и всего СП, а также его светотехнические параметры, которые в свою очередь зависят от области применения прибора.

Светотехнический расчет основывается на решении последовательности прямых задач расчета СП, т.е. нахождении светораспределения СП при известных параметрах оптической системы и источника света. Известны различные методы решения прямой задачи расчета СП, основанные на методе элементарных отображений, баланса потоков, численно-лучевых методов [1].

Оптический расчет, или расчет оптической системы, является основным этапом в разработке светового прибора, поскольку определяет не только технические, но и потребительские свойства разрабатываемого прибора. В результате его проведения определяются габаритные и абберрационные характеристики, параметры оптической системы и источников излучения, обеспечивающих заданные фотометрические характеристики светового прибора. Оптический расчет позволяет моделировать взаимодействие световых пучков лучей с системой линз, отражателей и др. [2].

В настоящее время для расчёта отражающих (преломляющих) поверхностей свободной формы используются различные численные и итерационные методы, позволяющие оптимизировать форму преломляющих поверхностей из условия формирования заданного

светового распределения. Эффективность существующих методов является недостаточно высокой, и задача расчёта оптики для формирования заданной освещённости по-прежнему имеет большое практическое значение [3]. В большинстве случаев расчет оптики - это трудоёмкий и длительный процесс. Если оптический расчёт выполнен некорректно или с ошибками, выяснится это только после выполнения всех остальных этапов проектирования и изготовления прибора, когда уже истрачены все запланированные временные и материальные ресурсы. Поэтому на современном этапе подразумевается использование вычислительной техники и применение специализированного программного обеспечения, позволяющих избавить инженеров от выполнения трудоемких расчетов, многовариантного анализа и большого объема графических работ. Подобные автоматизированные системы для расчета и моделирования световых приборов, использующие современные программные средства, существенно расширяют возможности современной светотехники [4].

1. Описание математической модели

Иерархические структуры в моделировании геометрии световых приборов. При решении широкого круга задач сложные объекты часто представляются в виде совокупности более простых, которые в свою очередь также разделяются на более мелкие составляющие. Этот процесс осуществляется до тех пор, пока не будет достигнута требуемая степень детализации с представлением объекта в виде древовидной (иерархической) структуры. Такой подход является очень удобным и оптимальным при расчете и проектировании многих технических систем, в качестве которых можно рассматривать и СП. В связи с этим было принято решение рассматривать СП также в виде иерархической структуры. В этом случае корневым элементом дерева выступает непосредственно сам СП, на следующем уровне иерархии расположены корпус, оптическая система, источник света, защитное стекло, узел подвеса, электрика (рис. 1). Каждая из этих частей в свою очередь может быть представлена более детально. Например, оптическая система – в виде совокупности отражателя, линзы и рассеивателя.

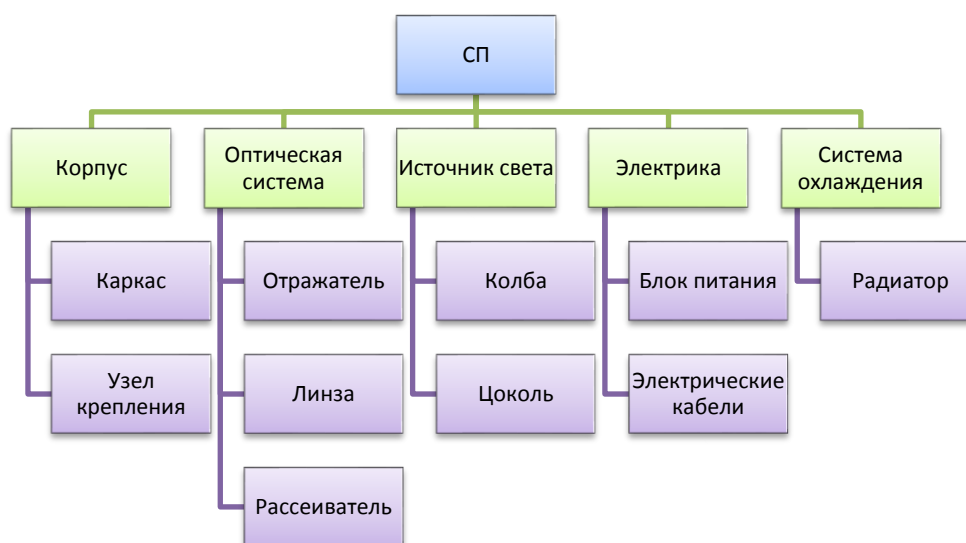


Рис. 1. Иерархическая структура СП

Элементы в этой структуре являются логическими узлами. Дочерние узлы наследуют значения свойств и параметров родительских узлов. Т.е. если скрыть какой-либо узел, то скроются и все его потомки. Аналогично, если у дочернего узла явно не указан тип материала, то он наследуется из родительского.

Также каждый родительский узел задает геометрический базис для дочерних узлов. Все координаты являются относительными. Перемещая, вращая или масштабируя в пространстве какой-либо узел (например, источник света), его составляющие (колба, цоколь) также будут перемещаться, вращаться и масштабироваться вместе с ним, образуя одну неделимую сущность.

Геометрия логических узлов. Для вычисления абсолютных координат узлов используются следующие аффинные преобразования:

- перемещение на вектор $\vec{P} = (p_x, p_y, p_z)$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix};$$

- поворот вокруг оси X на угол r_x

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r_x & -\sin r_x & 0 \\ 0 & \sin r_x & \cos r_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix};$$

- поворот вокруг оси Y на угол r_y

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos r_y & 0 & -\sin r_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin r_y & 0 & \cos r_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix};$$

- поворот вокруг оси Z на угол r_z

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos r_z & -\sin r_z & 0 & 0 \\ \sin r_z & \cos r_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix};$$

- масштабирование вдоль осей с коэффициентами s_x, s_y, s_z

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Порядок применения преобразований координат точек можно осуществлять в любой последовательности, но наиболее распространен следующий порядок: перемещение, повороты вокруг осей Z, Y, X, масштабирование. Чтобы задать другой порядок достаточно создать несколько вложенных узлов и к каждому применить нужный тип преобразования в требуемой последовательности, начиная с узла высшего уровня.

Таким образом, окончательное выражение преобразования относительных координат в абсолютные по заданному базису родительского узла имеет вид

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r_x & -\sin r_x & 0 \\ 0 & \sin r_x & \cos r_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos r_y & 0 & -\sin r_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin r_y & 0 & \cos r_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos r_z & -\sin r_z & 0 & 0 \\ \sin r_z & \cos r_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Логические узлы на более низких уровнях абстракции должны быть представлены в виде реальных объектов, например, отражающих поверхностей, светоизлучающих элементов, теплопроводящих пластин. Геометрия таких узлов моделируется с помощью триангуляционных сеток.

Триангуляционные сетки при геометрическом моделировании световых приборов. Сама по себе триангуляционная сетка состоит из вершин и граней. Вершины задают положение точек в пространстве, грани связывают три заданные вершины плоским треугольником. На рис. 2 приведен пример модели СД с поверхностью, представленной в виде триангуляционной сетки.

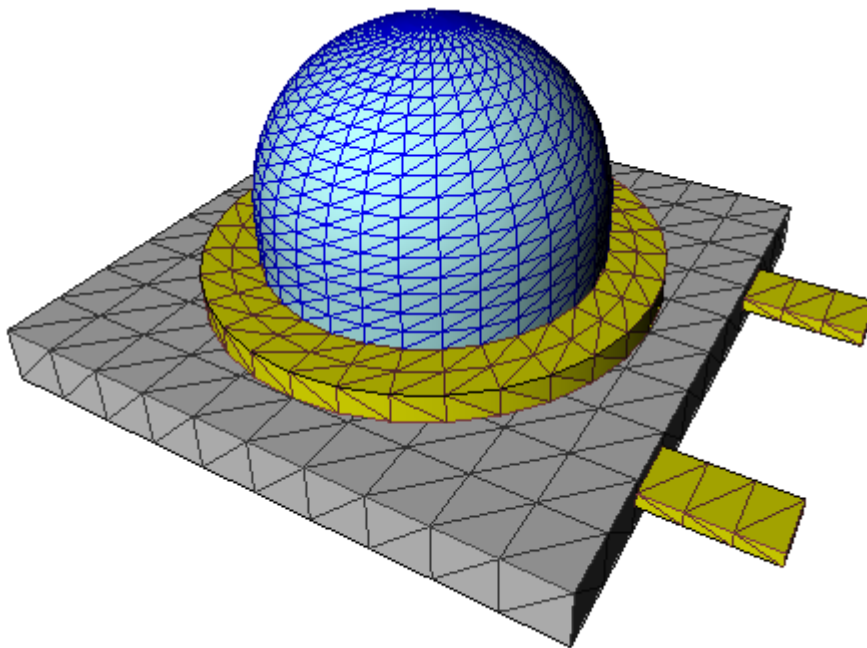


Рис. 2. Представление модели СД с помощью триангуляционной сетки

При светотехнических расчетах возникает задача моделирования гладких поверхностей, таких как: параболоиды, сферы, цилиндры, поскольку такие формы в большинстве случаев имеют оптические системы, которые и задают требуемое светораспределение [5]. Однако если при трассировке лучей считать грань триангуляционной сетки плоской, то лучи будут отражаться от нее пучками (рис. 3). В этом случае результат расчета светораспределения не будет соответствовать действительности: появятся всплески и провалы на поверхности фотометрического тела там, где должен получаться ровный участок. Лишь

значительное повышение плотности триангуляции (т.е. увеличение числа граней на единицу площади) может частично избавить от появления этого нежелательного эффекта.

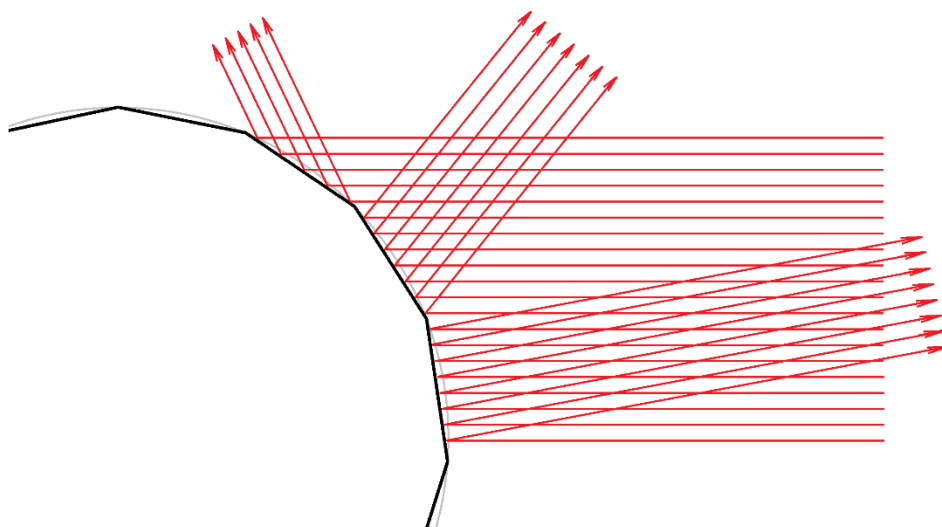


Рис. 3. Расхождение отраженных световых пучков от плоских граней

В связи с этим был введен третий компонент триангуляционной сетки – ребро. Оно связывает две вершины и указывает смежным граням, как вычислять векторы нормалей в связанных вершинах. Для этого каждое ребро задает либо заострение, либо плавный переход между смежными гранями. В первом случае (рис. 4, а) векторы нормалей в обеих вершинах будут перпендикулярны плоскостям соответствующих граней. Во втором (рис. 4, б) – векторы нормалей в этих вершинах для каждой грани будут совпадать и вычисляться как нормализованное среднее арифметическое перпендикулярных к граням векторов

$$\vec{N} = \left\| \sum_{k=1}^n \vec{N}_k / n \right\|.$$

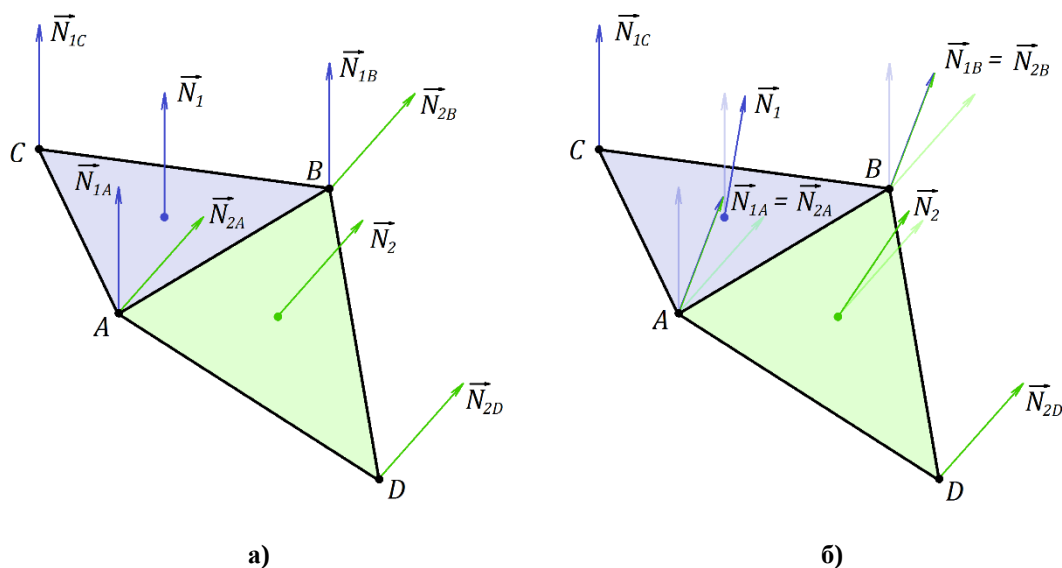


Рис. 4. Вычисление нормалей в вершинах:

а) ребро АВ задает заострение; б) ребро АВ задает плавный переход

В случае плавного перехода для этих граней направление вектора нормали будет зависеть от расположения точки на поверхности треугольника. Этот вектор вычисляется по формуле

$$\vec{N} = (\vec{N}_A - \vec{N}_C)\alpha + (\vec{N}_B - \vec{N}_C)\beta,$$

где $\vec{N}_A, \vec{N}_B, \vec{N}_C$ – векторы нормалей в соответствующих вершинах треугольника ABC, α и β – барицентрические координаты точки на поверхности треугольника.

На рис. 5 представлены два варианта цилиндрических поверхностей, заданных одинаковым набором вершин и граней триангуляционных сеток и отличающимися только типом вертикальных ребер.

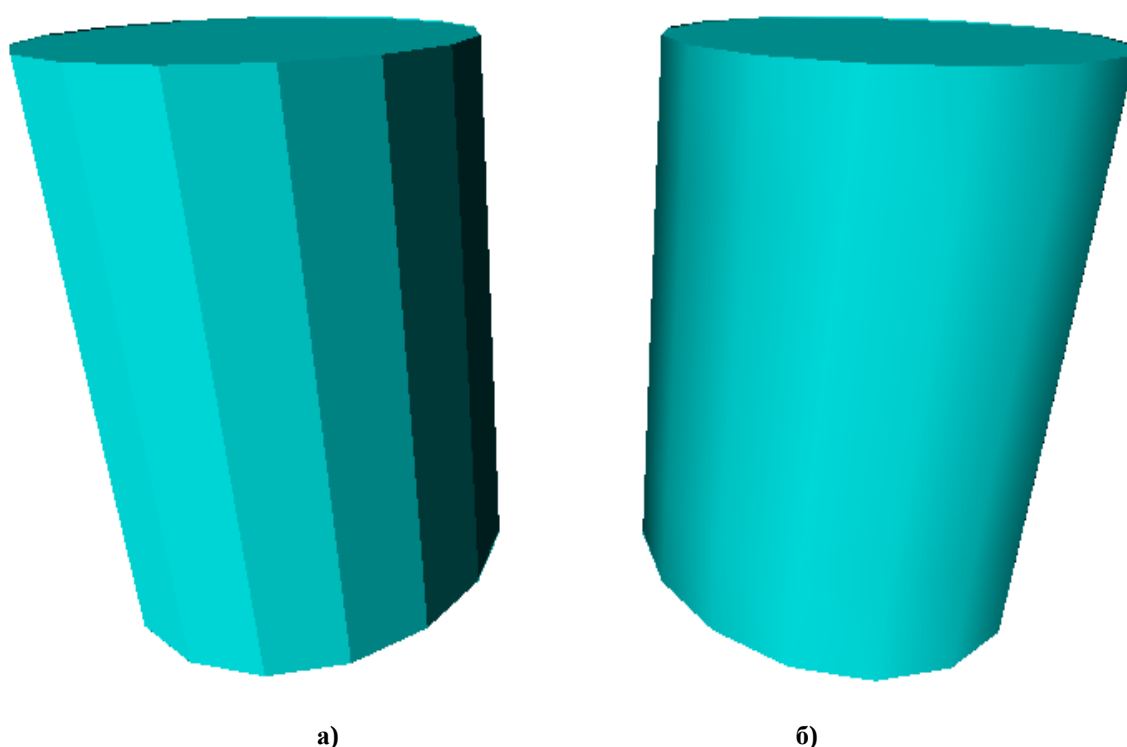


Рис. 5. Отличие поверхностей цилиндров с разными типами вертикальных ребер:
а) ребра задают заострение; б) ребра задают плавный переход

Таким образом, применение этого расширенного способа задания триангуляционной сетки с применением ребер позволяет значительно упростить процесс аппроксимации гладких поверхностей без какого-либо увеличения плотности самой сетки.

Формирование результирующей модели. Во многих СП имеются одинаковые элементы (например, светодиоды). Чтобы для каждого узла модели не создавать и не хранить одинаковые триангуляционные сетки, была обращена зависимость сетки от узла: каждый узел указывает на сетку, геометрию которой он использует. Данный принцип моделирования схематично представлен на рис. 6.

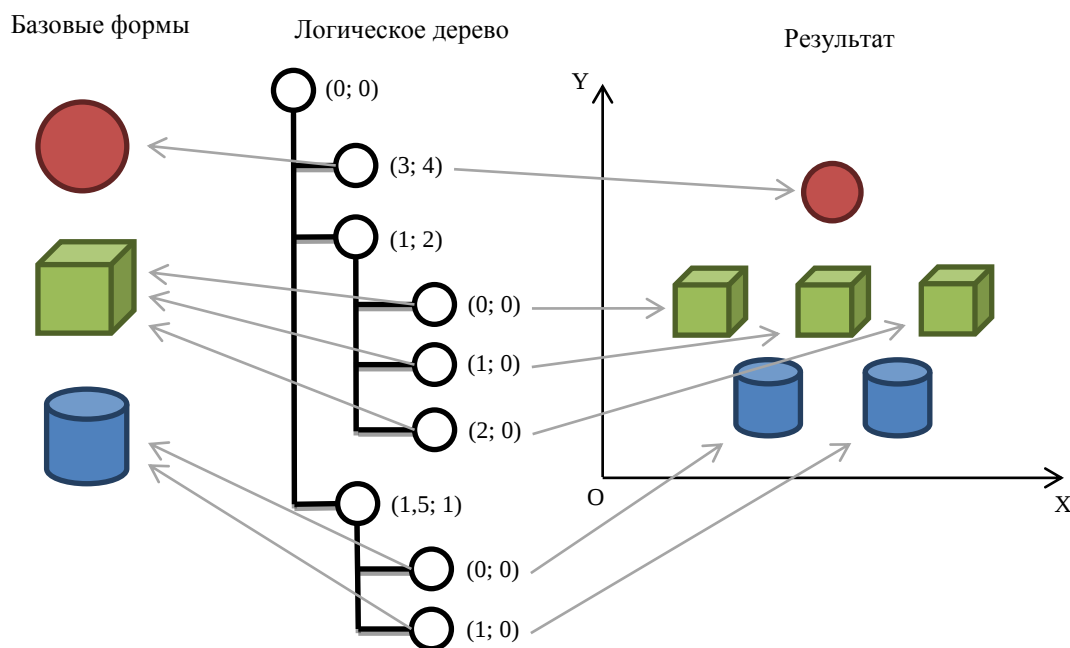


Рис. 6. Условная схема формирования результирующей модели на основе базовых форм и логического дерева

Теперь достаточно смоделировать одну или несколько базовых форм (деталей), создать и расположить в пространстве логические узлы и привязать данные формы к этим узлам. В результате получается модель, состоящая из одинаковых элементов. Корректируя форму одной детали, синхронно будут изменяться формы других.

Практическое применение такой схемы продемонстрировано на примере светодиодного модуля (рис. 7).

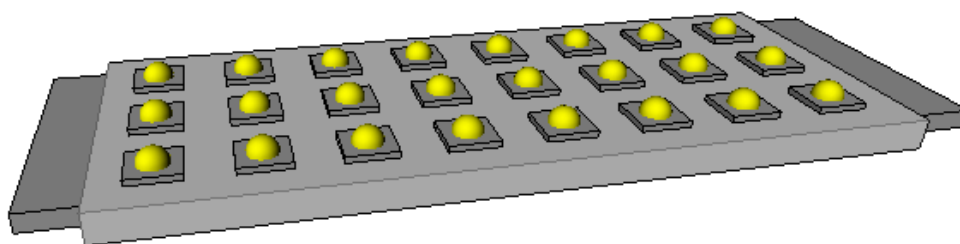


Рис. 7. Модель светодиодного модуля

Однако, при трассировке лучей необходимо денормализовать такую структуру путем дублирования узлов и построения одной глобальной триангуляционной сетки.

Таким образом, представленные базовые методы построения и организации геометрических моделей вполне применимы к моделированию конструктивных элементов СП. Это существенно облегчает процесс расчета, исследования и анализа разрабатываемых приборов.

2. Практическая реализация задачи моделирования СП

Описанные модели положены в основу разработанного программного комплекса, с помощью которого моделируется светодиодная оптика и приборы на ее основе. Расчет вторичной оптики светодиодов является одной из наиболее сложных задач, возникающих в светотехнике. Этот комплекс позволяет по известному световому распределению светодиода и требуемому световому распределению прибора смоделировать геометрию линзы с излучающей поверхностью, обеспечивающей комфортное зрительное восприятие и легко воспроизводимой современными методами производства.

В качестве исходных данных для расчета используются следующие параметры: кривая силы света (КСС - функция, описывающая зависимость силы света светодиода от направления наблюдения в выбранной плоскости, например, в горизонтальной; является сечением светового распределения этой плоскостью) светодиода, стандартная (требуемая) КСС прибора, показатель преломления материала оптики, габаритные размеры линзы [6].

На рис. 8 показан пример расчета светораспределения светильника, где на двух нижних видах приведено фотометрическое тело с разных ракурсов. Цветная шкала, содержащая информацию о минимальном и максимальном значениях силы света, помогает «на глаз» оценить силу света в конкретном направлении. Кривая силы света в правом верхнем углу является сечением фотометрического тела заданной плоскостью.

Исследуя и анализируя полученные данные о светораспределении, проектировщик пытается подобрать такие параметры модели оптической системы, чтобы получить требуемые характеристики светового прибора.

На рис. 9-10 показан процесс построения модели TIR-оптики для единичного светодиода, трассировки лучей для заданного типа поверхности с получением фотометрического тела.

Заключение

В современной светотехнике расчет и моделирование светотехнических характеристик светодиодных модулей и световых приборов является актуальной задачей. Разработанный программный комплекс позволяет значительно облегчить процесс проектирования оптических светодиодных систем и повысить их качество. В данном комплексе световой прибор как сложное изделие рассматривается в виде иерархической структуры в виде родительских и дочерних узлов, геометрия которых моделируется с помощью триангуляционных сеток. Для сглаживания поверхности оптического элемента и фотометрического тела было введено ребро в качестве дополнительного элемента триангуляционной сетки. Такое задание триангуляционной сетки позволяет существенно упростить процесс аппроксимации гладких поверхностей. Также в разработанной программе формирование результирующей модели было реализовано на основе базовых форм и логического дерева, что обеспечивает синхронность изменения форм однотипных элементов. С помощью данного программного комплекса было осуществлено моделирование светодиодной вторичной оптики путем разработки моделей поверхностей, трассировки лучей для заданного типа поверхности с получением фотометрического тела.

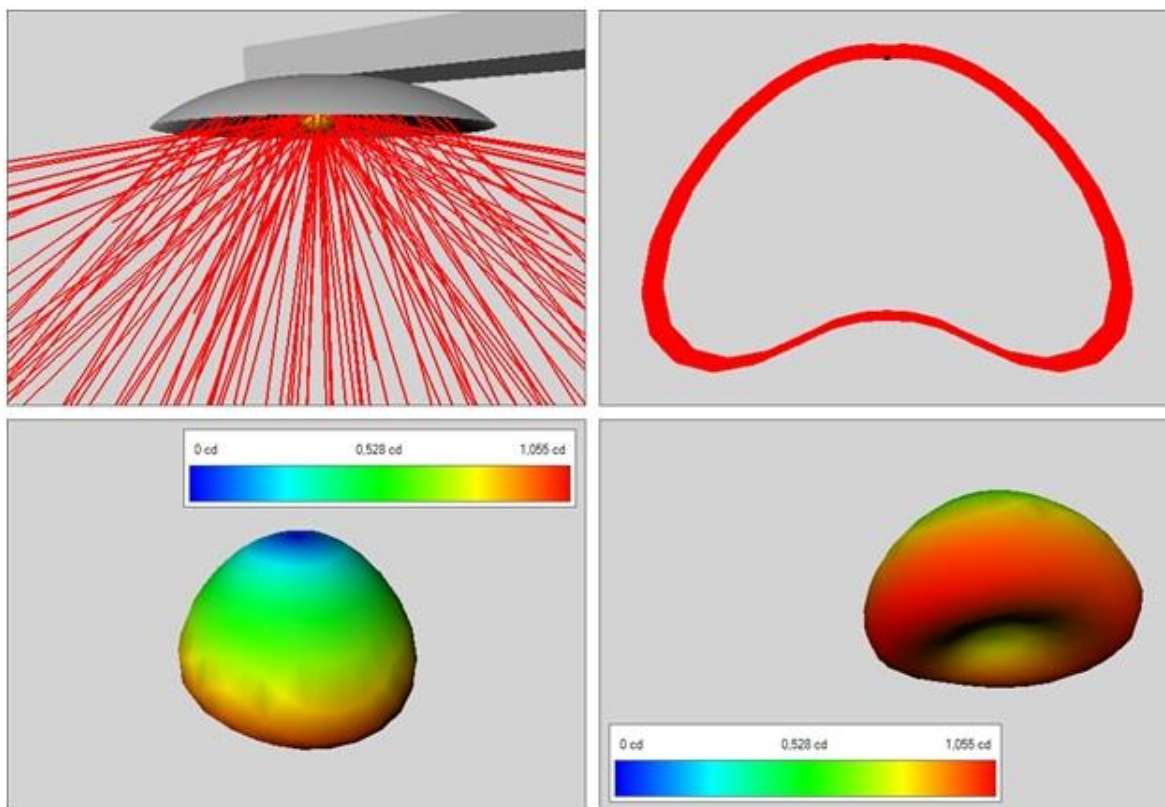


Рис. 8. Модели и светораспределение уличного светильника

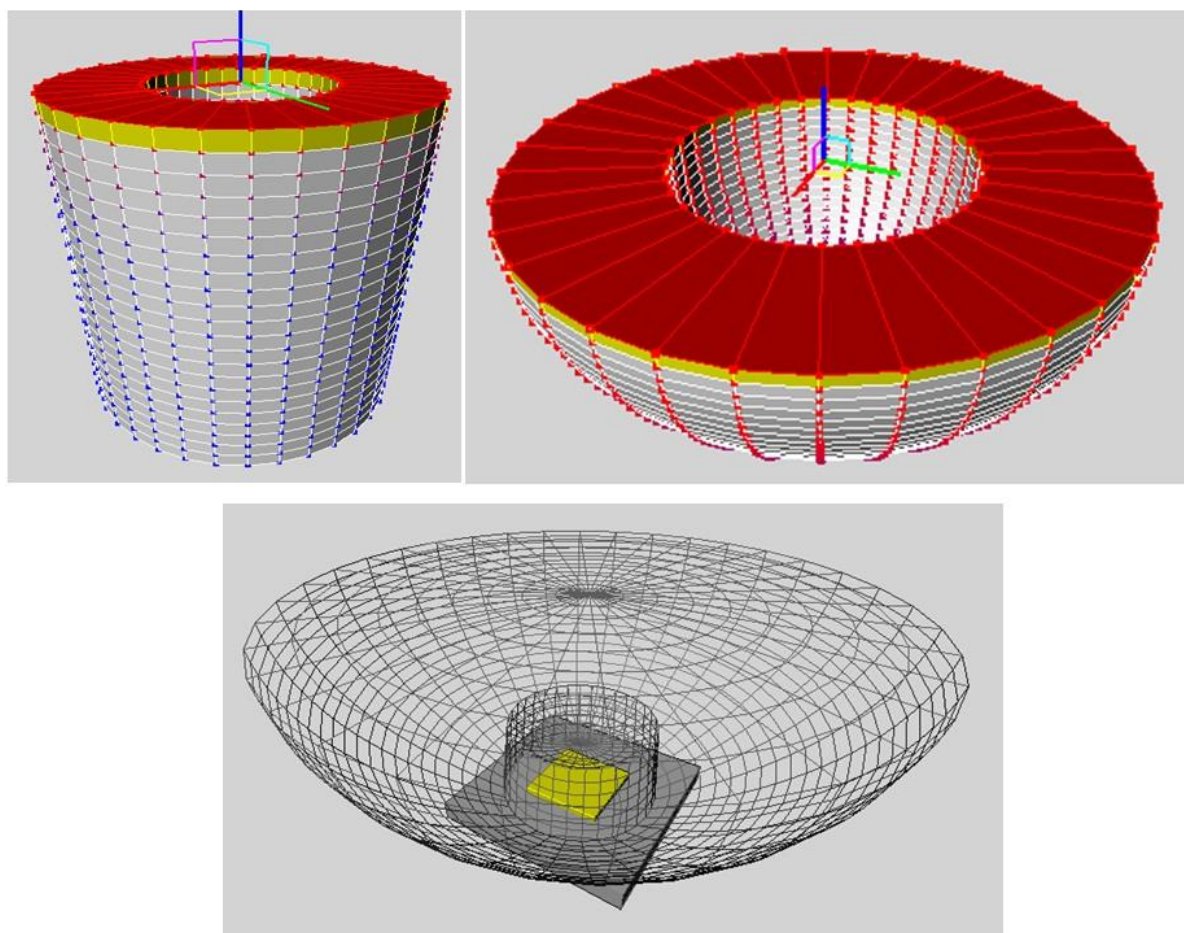


Рис. 9. Построение модели TIR-оптики для светодиода

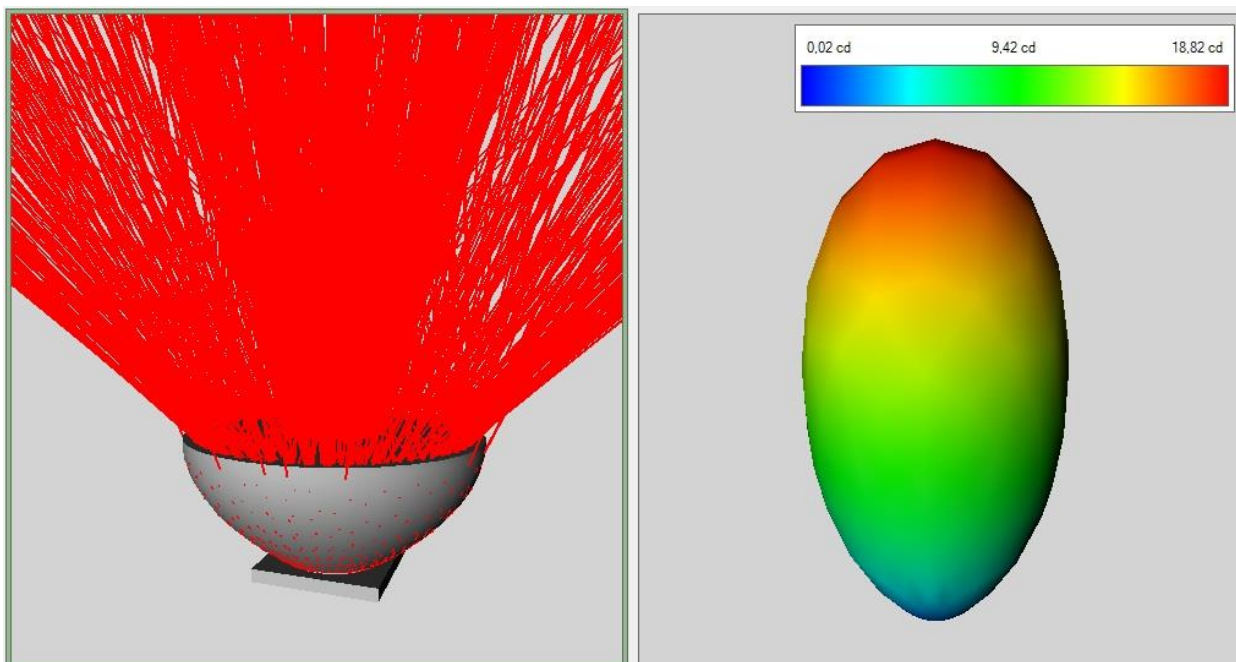


Рис. 10. Результат расчета светораспределения для модели светодиода с TIR-оптикой

Список литературы

- [1]. Куш О. К. Оптический расчет световых и облучательных приборов на ЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1991. 152 с.
- [2]. Байнев В.В., Байнева И.И. Оптические системы для светодиодов // Фотоника. 2016. № 2(56). С.84-93.
- [3]. Fournier F.R., Cassarly W.J., Rolland J.P. Fast freeform reflector generation using source-target maps // Optics Express. 2010. Vol. 18, № 5. P. 5295-5304.
- [4]. Байнева И. И., Байнев В. В. Применение программ оптического моделирования в учебной и научной деятельности // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015, №4(28). С.53-62.
- [5]. Федосин С.А., Байнев В.В. Геометрические модели и их программная реализация для компьютерного исследования и проектирования световых приборов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016, №6. С. 35-40.
- [6]. Bayneva I. I. Concerns Of Design Of The Energy-Efficient Fixtures // International Journal of Applied Engineering Research. 2015, Vol.10, с 3. P. 6479-6487.