



ПРИМЕНЕНИЕ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ СЕТОК И ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУР МОДЕЛЕЙ В РАСЧЕТЕ СВЕТОДИОДНЫХ МОДУЛЕЙ

В.В.Байнев, аспирант, bw14@mail.ru,
кафедра "Автоматизированные системы обработки информации и управления" института
электроники и светотехники", Национальный
исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П.Огарева, Саранск

Расчет оптической системы является основным этапом в разработке светового прибора, поскольку определяет не только технические, но и потребительские свойства разрабатываемого прибора. Представлен обзор наиболее известных программных продуктов для светотехнического проектирования. Рассмотрены особенности построения математической модели, положенной в основу программного комплекса LightModeling, и принципы его работы на примере моделирования светодиодной вторичной оптики. Созданы модели поверхностей, выполнена трассировка лучей для заданного типа поверхности с получением фотометрического тела.

ВВЕДЕНИЕ

Использование световых приборов с высоким коэффициентом полезного действия позволяет заметно увеличить эффективность светотехнических установок массового использования и снизить при этом их энергопотребление. Поэтому проектирование световых приборов (СП) – важная и актуальная задача современной светотехнической промышленности. Развитие технологий создания световых приборов в значительной мере определяется состоянием и развитием методов их светотехнического расчета. Результаты такого расчета во многом определяют форму и размеры оптической системы и всего СП, а также его светотехнические параметры, связанные с условиями применения прибора.

TRIANGULATION GRIDS AND HIERARCHICAL STRUCTURES OF THE MODELS IN CALCULATION OF LED MODULES

V.V.Baynev, graduate student, bw14@mail.ru,
Department of Automated information processing
systems and Management, Institute of Electronic and
Light Engineering, Ogarev National Research State
University of Mordovia, Saransk

The calculation of the optical system of a light device determines not only its technical properties, but also the consumer ones. The review of the most prominent software products for lighting design is given. The features of the Light Modeling software package are considered using the example of designing LED secondary optics using surface models, ray tracing and calculation of a photometric body.

INTRODUCTION

The use of light devices with a high coefficient of efficiency makes it possible to significantly increase the efficiency of lighting equipment for mass use and to reduce their energy consumption. Therefore, the design of light devices (LD) is an important and urgent task for the modern lighting industry. The development of the technology of creating light devices is largely determined by the state and development of methods for their lighting design. The results of the calculation largely determine the shape and dimensions of the optical system and the entire LD, as well as its lighting parameters associated with the device application conditions.

The solution of the sequence of direct problems of calculating the LD lies at the heart of the lighting design, i.e. finding the LD light distribution with the known parameters of the optical system and the light source. Various methods for solving the direct LD calculation problem are known, based on the method of elementary mappings, balance of flows and numerical-ray methods [1].

The optical system calculation is the main stage in the development of a light device, since it determines not only the technical properties, but also the consumer ones of the device under development.



В основе светотехнического расчета лежит решение последовательности прямых задач расчета СП, т.е. нахождение 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 методах [1].

Расчет оптической системы является основным этапом в разработке светового прибора, поскольку определяет не только технические, но и потребительские свойства разрабатываемого прибора. В результате проведения оптического расчета определяются геометрические характеристики оптической системы и источников излучения, их параметры, обеспечивающие заданные фотометрические характеристики светового прибора [2]. При выполнении оптического расчета моделируется прохождение световых лучей в системах, состоящих из линз, отражателей и др. [3].

1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДЛЯ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Практика использования различных осветительных устройств свидетельствует о необходимости иметь гибкие методы и средства их проектирования. Для расчета отражающих (преломляющих) поверхностей свободной формы используются различные численные и итерационные методы, позволяющие оптимизировать форму преломляющих поверхностей из условия формирования заданного светового распределения. В большинстве случаев расчет оптики – это трудоемкий, длительный и очень ответственный процесс. Если оптический расчет выполнен некорректно или с ошибками, выяснится это только после выполнения всех остальных этапов

The optical calculation leads to determination of the geometric characteristics of the optical system and radiation sources, as well as of their parameters that ensure the given photometric characteristics of the light device [2]. When optical calculation is performed, the transmission of light rays in systems consisting of lenses, reflectors, etc. is modeled [3].

1. METHODS AND MEANS FOR CALCULATING AND DESIGNING LIGHTING SYSTEMS

The practice of using different lighting devices indicates the need for flexible methods and means for their design. Numerical and iterative methods are used to calculate the reflecting (refracting) surfaces of a free form, allowing optimizing the shape of the refractive surfaces based on the conditions for the formation of given light distribution. In most cases, the optics calculation is a time-consuming, lengthy and very responsible process. If the optics calculation is performed incorrectly or with errors, it will only become clear after all the other design and construction stages have been completed, when all the planned time and material resources have already been spent. Errors can also occur during the operation of such devices, which is fraught with serious consequences, including in terms of personal safety. Furthermore the effectiveness of existing methods is still not high enough to meet practical needs. Therefore, the problem of optics calculation for the formation of a given lighting still plays a large role [4].

The use of computing technology and the use of specialized software can relieve the engineers from time-consuming calculations, multivariate analysis and a large amount of graphic work. Such automated systems for calculating and modeling of lighting systems using modern software significantly expand the possibilities of modern lighting technology. Modern computer computing technologies allow



проектирования и изготовления прибора, когда уже истрачены все запланированные временные и материальные ресурсы. Ошибки могут проявиться также в ходе эксплуатации таких приборов, что чревато серьезными последствиями, в том числе с точки зрения безопасности людей. И эффективность существующих методов пока недостаточно высока для удовлетворения практических нужд. Поэтому задача расчета оптики для формирования заданной освещенности по-прежнему играет большую роль [4].

Использование вычислительной техники и применение специализированного программного обеспечения позволяет избавить инженеров от выполнения трудоемких расчетов, многовариантного анализа и большого объема графических работ. Подобные автоматизированные системы для расчета и моделирования осветительных систем, использующие современные программные средства, существенно расширяют возможности современной светотехники. Современные компьютерные вычислительные технологии позволяют существенно расширить возможности для моделирования и исследования оптических систем, создавая при этом удобный интерфейс пользователя.

В настоящее время в светотехническом проектировании и производстве используются следующие наиболее известные программные продукты.

DIALux - профессиональный пакет для работы с освещением, производит расчет таких световых характеристик, как яркость, освещенность, показатели блесткости, коэффициент естественного освещения и пр., позволяет рассчитывать дневной свет и тени при планировании освещения, принимая во внимание географическое расположение здания, погодные условия и тени от окружающих строений и прочих объектов. DIALux также осуществляет моделирование различных световых сцен в помещениях.

Программный продукт Light-in-Night Road предназначен для расчета уличного освещения, проектирования наружного освещения внегородских автомагистралей, улично-дорожной сети городов и сельских населенных пунктов и связанной с ней инфраструктуры. Программа позволяет проводить расчеты освещения для трех классов объектов: прямолинейных участков дорог и улиц, типовых участков дорог и участков произвольной конфигурации. Она рассчитывает распределение освещенности и яркости дорожного покрытия, нормируемые значения среднего

expanding the possibilities for modeling and researching optical systems significantly, while creating a user-friendly interface.

Currently, the following most famous software products are used in lighting design and production.

DIALux is a professional package for working with lighting, which calculates light characteristics such as brightness, lightness, glossiness, natural light ratio, etc., allowing calculating daylight and shadows when planning lighting, taking into account the geographical location of the building, weather conditions and shadows from surrounding buildings and other objects. DIALux also simulates various light scenes in the rooms.

Light-in-Night Road software product is designed for calculating street lighting, for designing outdoor lighting for off-city highways, street network of cities and rural settlements and related infrastructure. The program allows carrying out lighting calculations for three classes of objects: straight-line sections of roads and streets, typical sections of roads and areas of arbitrary configuration. It calculates the distribution of illumination and brightness of the road surface, normalized values of the average level and uniformity of these characteristics, regulating indicators of blinding the driver by light devices, etc.

However, the analysis of the above mentioned software has shown their task to be mainly in the design of lighting, and they do not deal with calculation and modeling of light-redistributing devices.

For the design of lighting systems, several programs based on different principles of work are used [5]. In some programs, sequence of relative positions of the constituent elements is indicated to represent and analyze the operation of the optical system, and the calculation of the rays is performed sequentially. The other use the global coordinate system and inconsistent calculation of the rays to analyze the operation of the system. This approach is usually applied for the design and analysis of lighting systems.

Currently, foreign software packages such as Zemax, TracePro, Light Tools, OSLO, ASAP, etc. are widely used for the development of optical systems. They have a wide range of functions, including modeling the propagation of light from the sources to radiation receivers.

One Zemax feature is the ability to analyze a consistent and inconsistent calculation of the rays, the ability to calculate designs from lenses, mirrors, diffraction gratings, light filters and other optical



уровня и равномерности этих характеристик, регламентируемые показатели ослепленности водителя световыми приборами и пр.

Однако анализ вышеупомянутых программных средств показал, что их задача заключается в основном в проектировании освещения, а расчетом и моделированием светоперераспределяющих устройств они не занимаются.

Для проектирования осветительных систем используется несколько программ, основанных на разных принципах работы [5]. В одних программах для представления и анализа работы оптической системы указывается последовательность взаимного расположения составляющих ее элементов, и расчет лучей выполняется последовательно. В других - для анализа работы системы используют глобальную систему координат и непоследовательный расчет лучей. Именно такой подход характерен обычно для проектирования и анализа осветительных систем.

В настоящее время для разработки оптических систем широко применяются такие зарубежные программные комплексы, как Zemax, TracePro, Light Tools, OSLO, ASAP и др. Они располагают большим набором функций, включа-

elements. LightTools program builds models of lighting systems, where the effects of refraction, reflection, scattering, etc. are taken into account in the calculation of rays. The lighting analysis uses direct ray tracing, which simulates the propagation of light through the model, and a reverse tracer showing the lighting source from the receiver point.

In the design of lighting optical systems, TracePro software is widely used for the calculation of rays and photometric analysis, apparently, due to its low cost. It has a three-dimensional solid-state visualization, the ability to model optical processes based on models created in CAD systems such as SolidWorks, COMPASS. This also significantly facilitates the research process and, importantly, reduces costs for the developer [6].

Photopia (LTI Optics) provides computer modeling of luminaires and their photometric analysis. It can be integrated as a module in SolidWorks, and also allows you to import files into AutoCAD, Pro/Engineer. Furthermore, the program has a database of light sources and materials.

However, many software systems have significant disadvantages: they are sometimes not built to perform highly specialized operations, or require very thorough study of models. Not the least role for



ющих моделирование распространения света от источников до приемников излучения.

Особенностью Zemax является наличие возможностей анализа последовательного и непоследовательного расчета лучей, способности расчета конструкций из линз, зеркал, дифракционных решеток, светофильтров и других оптических элементов. Программа LightTools строит модели осветительных систем, где при расчете лучей учитываются явления преломления, отражения, рассеяния и пр. Анализ освещенности использует прямую трассировку лучей, моделирующую распространение света через модель, и обратную трассировку, демонстрирующую источник освещенности с точки приемника.

При проектировании осветительных оптических систем для расчета лучей и фотометрического анализа достаточно широкое распространение, по-видимому в связи с низкой стоимостью, получила программа TracePro. В ней имеется трехмерная твердотельная визуализация, возможность моделирования оптических процессов на базе моделей, созданных в CAD-системах типа SolidWorks, КОМПАС. Это также существенно облегчает процесс исследования и снижает затраты для разработчика [6].

Photopia (LTI Optics) осуществляет компьютерное моделирование светильников и их фотометрический анализ. Она может быть встроена в виде модуля в SolidWorks, позволяет импортировать файлы в AutoCAD, Pro/Engineer. Кроме того, программа располагает базой данных источников света и материалов.

Однако многие программные комплексы имеют существенные минусы: они либо не "заточены" на выполнение узкоспециализированных действий, либо требуют очень глубокой проработки моделей. Не последнюю роль для их широкого продвижения в России играет стоимость, которая может составлять сотни тысяч долларов. Кроме того, в настоящее время настала острая необходимость в снижении зависимости отечественного производства от зарубежного программного обеспечения и разработке собственных программных средств.

В связи с возросшей потребностью российской светотехнической отрасли в компьютерных средствах для исследования и проектирования осветительных приборов была начата работа по созданию собственного программно-математического средства в виде специализированной системы с возможностями геометриче-

their wide promotion in Russia is the cost, which can amount to hundreds of thousands of dollars. Furthermore, there is now an urgent need to reduce the dependence of domestic production on foreign software and the development of proprietary software products.

In connection with the increased need of the Russian lighting industry in computer facilities for research and design of lighting devices, the creation of own software and mathematical tools in the form of a specialized system with the possibilities of geometric modeling has been started. Let's consider the features of construction of the mathematical model underlying LightModeling software package, and its operational principles as illustrated by the modeling of LED module structure and its light distribution for a street light.

2. MATHEMATICAL MODEL DESCRIPTION

Hierarchical structures in the light devices geometry modeling

When solving a wide range of problems, complex objects are often represented as a collection of simpler ones, which in turn are also disintegrated into smaller components. This process is carried out until the required degree of detail is achieved with the representation of the object in the form of a tree (hierarchical) structure. This approach is very convenient and optimal in the calculation and design of many technical systems, which can be considered as a LD. In this regard, it was decided to consider the LD also in the form of a hierarchical structure. In this case, the LD directly acts as the root element of the tree, where a casing, an optical system, a light source, a protective glass, a suspension assembly and electrics are placed in the next level of the hierarchy (Fig. 1). Each of these parts, in turn, can be presented in more detail. For example, an optical system can be presented in the form of a set of reflector, lens and diffuser.

The elements in this structure are logic nodes. Descending nodes inherit the values of the properties and parameters of the parent nodes. Therefore, if you hide any node, then all of its descendants will also disappear. Similarly, if the descending node does not explicitly specify the type of material, then it is inherited from the parent.

Also, each parent node specifies a geometric basis for the descending nodes. All coordinates are relative. By moving, rotating or scaling any node in space (for example, a light source), its components (bulb, cap) will also move, rotate and scale therewith, forming one indivisible entity.



ского моделирования. Рассмотрим особенности построения математической модели, положенной в основу данного программного комплекса LightModeling, и принципы его работы на примере моделирования структуры светодиодного модуля и его светораспределения для уличного светильника.

2. 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 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.

Logic nodes geometry

To calculate the absolute node coordinates, the following affine transformations are used:

- moving to a vector of $\bar{P} = (p_x, p_y, p_z)$

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

- turn around the X axis by an angle of r_x

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

- turn around the Y axis by an angle of r_y

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

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.

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

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

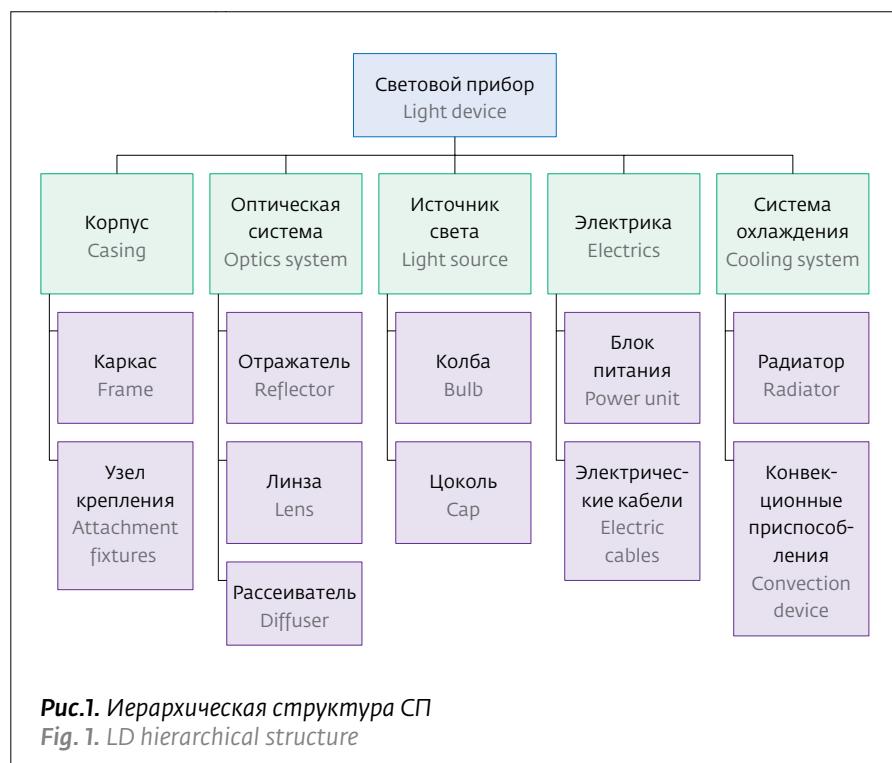


Рис.1. Иерархическая структура СП
Fig. 1. LD hierarchical structure

- turn around the Z axis by an angle of r_z

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

- scaling along the axes with the coefficients of s_x, s_y, s_z

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

The coordinates transformation order of points can be carried out in any sequence, but the most common order is: moving, turning around the Z, Y, X axes, scaling. To specify a different order, creating several nested nodes and applying the desired type of transformation to each one in the required sequence, starting with the top-level node, is enough.

Thus, the final expression for converting the relative coordinates to absolute ones according to the given basis of the parent node has the following form



- поворот вокруг оси Y на угол r_y

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

- 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

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

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

Logical nodes at lower levels of abstraction shall be represented in the form of real objects, for example, reflecting surfaces, light-emitting elements, and heat-conducting plates. The geometry of such nodes is modeled with the help of triangulation grids.

Triangulation grids for light devices geometric modeling

The triangulation grid as such consists of vertices and faces. The vertices define the position of points in space; the faces connect the three given vertices by a planar triangle. Figure 2 shows an example of a LED model with a surface represented as a triangulation grid.

In lighting calculations, there is a problem of modeling smooth surfaces, such as: paraboloids, spheres, cylinders, since in most cases such forms have optical systems that specify the required light distribution [7]. However, if the triangulation grid is assumed to be plane for the purposes of ray tracing, when the rays will be reflected by beams (Fig. 3). In this case, the result of the calculation of the light distribution will not correspond to reality: there will be bursts and dips on the surface of the photometric body where an equal portion should be obtained. Only a significant increase in the density of the triangulation (i.e., an increase in the number of faces per unit area) can partially relieve this undesirable effect.

Hence, the third component of the triangulation grid, the edge, was introduced. It links two vertices and indicates adjacent faces the way to calculate the normal vectors at the associated vertices. For that end, each edge specifies either a sharpening, or a smooth transition between adjacent faces. In the first case (Fig. 4a) the normal vectors at both vertices will be

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.

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 [7]. 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.

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.4а) векторы нормалей в обеих вершинах будут перпендикулярны плоскостям соответствующих граней. Во втором (рис.4б) – векторы нормалей в этих вершинах для каждой грани будут совпадать и вычисляться как нормализованное среднее арифметическое перпендикулярных к граням векторов

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

В случае плавного перехода для этих граней направление вектора нормали будет зависеть

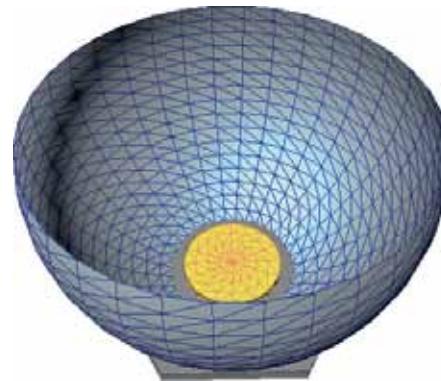


Рис.2. Представление модели СД с помощью триангуляционной сетки

Fig. 2. Representation of LD model by means of triangulation grid

perpendicular to the planes of the corresponding faces. In the second case (Fig. 4b), the normal vectors at these vertices for each face will coincide and shall be calculated as the normalized arithmetic mean of the vectors perpendicular to the faces

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

In the case of smooth transition for these faces, the direction of the normal vector will depend on the location of the point on the triangle surface. This vector is calculated by the following formula

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

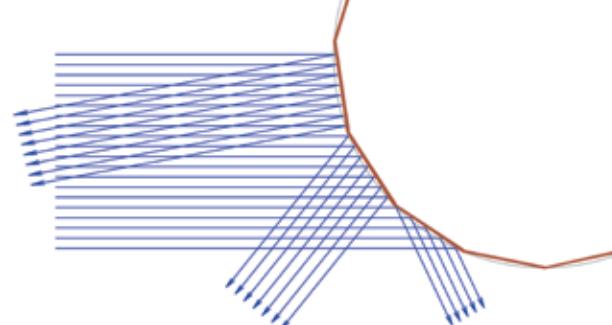


Рис.3. Расхождение отраженных световых пучков от плоских граней

Fig. 3. Divergence of reflected light beams from planar faces

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 поверхностей тора, заданных одинаковым набором вершин и граней триангуляционных сеток и отличающимися только типом концентрических и перпендикулярных ребер.

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 и без ручного задания векторов нормалей.

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. Данний принцип моделирования схематично представлен на рис.6. 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. При корректировании формы одной детали синхронно будут изменяться формы других. Практическое применение такой схемы продемонстрировано на примере светодиодного модуля (рис.7).

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.

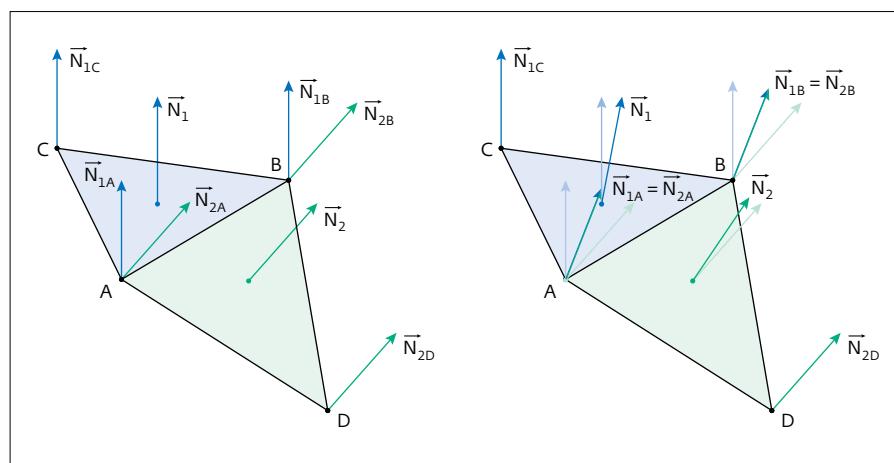


Рис.4. Вычисление нормалей в вершинах: а) ребро АВ задает заострение; б) ребро АВ задает плавный переход

Fig. 4. Calculation of normals at vertices: a) AB edge specifies the point; b) AB edge specifies smooth transition

where $\vec{N}_A, \vec{N}_B, \vec{N}_C$ are normal vectors at the corresponding vertices of the ABC triangle, α and β are the barycentric coordinates of the point on the triangle surface.

Fig. 5 shows two variants of torus surfaces defined by the same set of vertices and faces of triangulation grids and differing only in the type of concentric and perpendicular edges.

Thus, the application of this expanded method of specifying a triangulation grid with the use of edges makes it possible to greatly simplify the smooth surfaces approximation process without any increase in the density of the grid as such and without manually specifying the normal vectors.

Resulting model creation

Many LD have the same elements (e.g., LEDs). In order to avoid creating and storing the same triangulation grids for each model node, the grid was

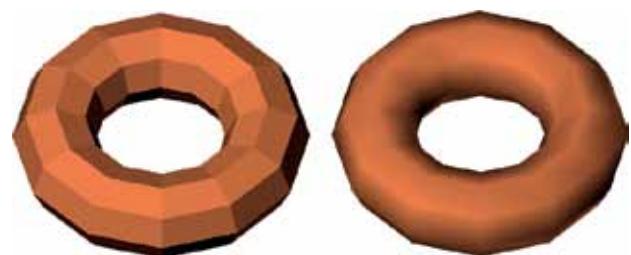


Рис.5. Отличие поверхностей торов с разными типами ребер: а) ребра задают заострение; б) ребра задают плавный переход

Fig. 5. Difference of torus surfaces with different types of edges: A) edges are pointed; B) edges define smooth transition

3. 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 [8].

На рис.8 показан пример расчета светораспределения единичного светодиодного модуля, где приведено фотометрическое тело. Цветная шкала, содержащая информацию о минимальном и максимальном значениях силы света, помогает "на глаз" оценить силу света в конкретном направлении. Исследуя и анализируя полученные данные



Рис.7. Модель светодиодного модуля
Fig. 7. LED module model

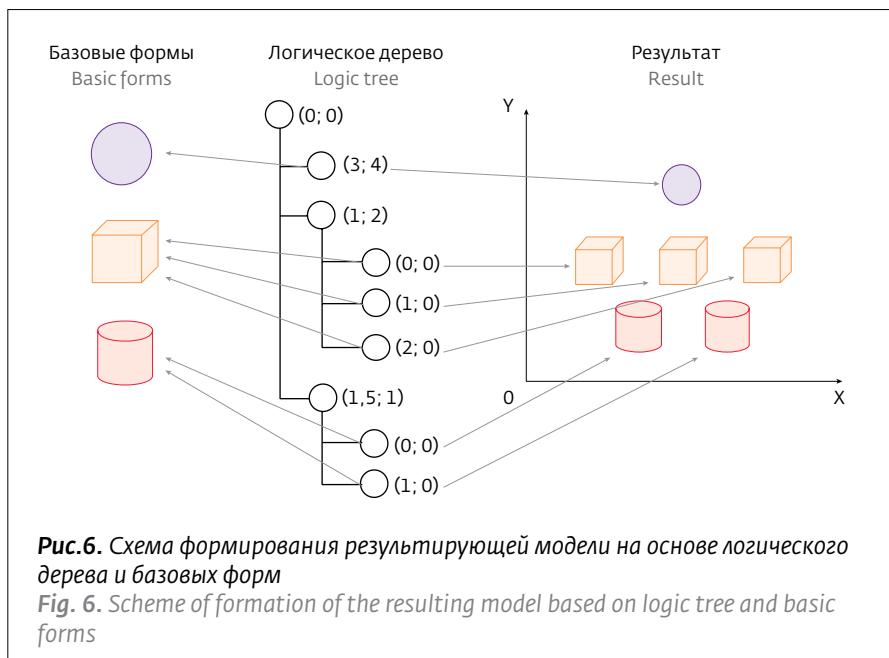


Рис.6. Схема формирования результирующей модели на основе логического дерева и базовых форм

Fig. 6. Scheme of formation of the resulting model based on logic tree and basic forms

mapped based on the node: each node points to a grid which geometry it uses. This principle of modeling is shown schematically in Fig. 6. Now it is enough to simulate one or several basic forms (details), create and arrange logical nodes in space and bind these forms to the nodes. As a result, a model consisting of the same elements is obtained. When you adjust the shape of one part, the forms of the other will synchronously change. The practical application of such scheme is demonstrated by an example of LED module (Fig. 7).

However, when ray tracing is required, it is necessary to denormalize such structure by duplicating nodes and constructing one global triangulation grid. Thus, the presented basic methods for constructing and organizing geometric models are quite applicable to modeling of the LD structural elements. This greatly facilitates the process of calculating, studying and analyzing the devices under development.

3. PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE LD MODELING TASK

The described models are the basis for the developed software package, used for LED optics and devices modeling. The calculation of LED secondary optics is one of the most complex problems in lighting engineering. This package, according to the known LED light distribution and the required light distribution of the device, allows you to simulate the geometry of the lens with a radiating surface providing a comfortable visual perception and easily reproduced by modern production methods.

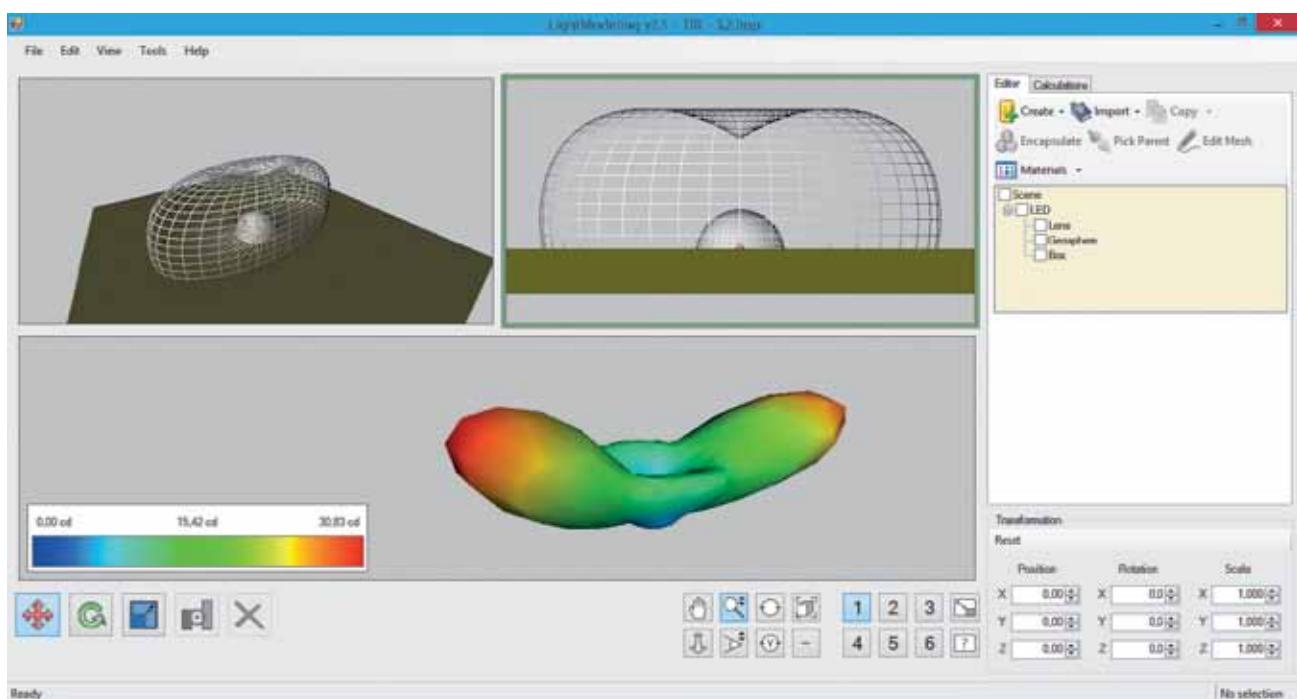


Рис.8. Модель единичного светодиодного модуля и его светораспределение
Fig. 8. Single LED module model and its light distribution

о светораспределении, проектировщик пытается подобрать такие параметры модели оптической системы, чтобы получить требуемые характеристики светового прибора. На рис.9-12 показаны соответственно модель СД модуля для СП, модель самого светодиодного уличного СП, процесс трассировки лучей от светодиодного модуля, рабочее окно программы, где отражены модели СД и СД модуля, упрощенная модель светильника, процесс трассировки лучей и полученное фотометрическое тело, которое характерно для широкой кривой силы света.

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, представляющий собой сложное изделие, рассматривается как иерархическая структура в виде родительских и дочерних узлов, геометрия которых моделируется с помощью триангуляционных сеток. Для сглаживания поверхности оптического эле-

The following parameters are used as the initial data for the calculation: light intensity curve (LIC is a function describing the dependence of the LED light intensity from the direction of observation in the selected plane, e.g., in the horizontal plane, and it is a cross section of the light distribution by this plane) of LED, the standard (required) LIC of the device, refractive index of the optics material, lens overall dimensions [8].

Fig. 8 shows an example of calculating the light distribution of a single LED module, where the photometric body is given. The color scale, containing

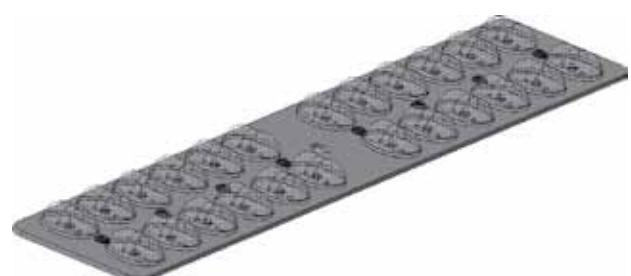


Рис.9. Модель СД модуля для светодиодного уличного светильника
Fig. 9. LED module model for LED street light

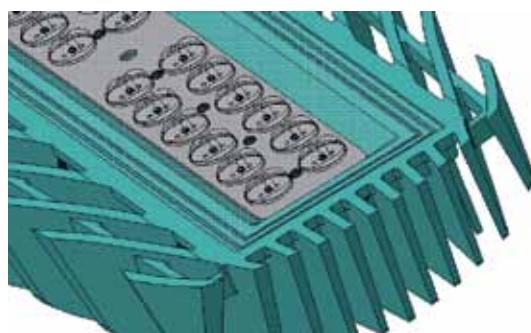


Рис.10. Модель светодиодного уличного светильника
Fig. 10. LED street light model

мента 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кущ О.К. Оптический расчет световых и облучательных приборов на ЭВМ.– М.: Энергоатомиздат, 1991.

information about the minimum and maximum values of the intensity of light, helps to approximately assess the strength of light in a particular direction. When studying and analyzing the obtained data on light distribution, the designer tries to select such parameters of the optical system model in order to obtain the required characteristics of the light device. Fig. 9-12, respectively, show the LD module model for the LD, the model of the LED street light as such, the process of ray tracing from the LED module, the software work window, where the LED and LED module models are reflected, the simplified model of the luminaire, the ray tracing process and the photometric body obtained for a broad light intensity curve.

CONCLUSION

In modern lighting engineering, calculation and modeling of lighting characteristics of light-emitting modules and light devices is an urgent task. The

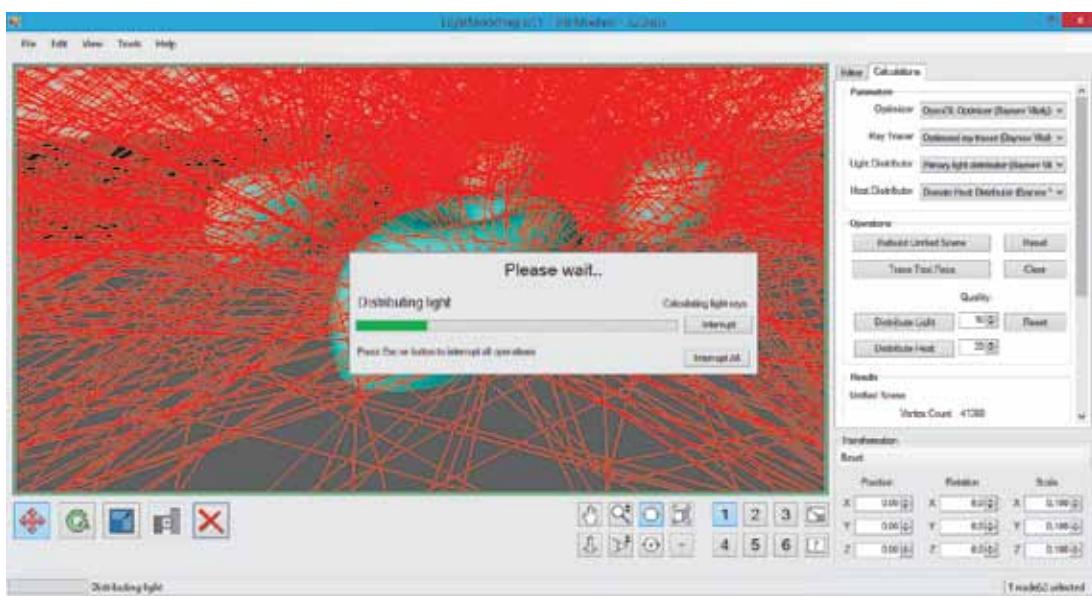


Рис.11. Процесс трассировки лучей от светодиодного модуля
Fig. 11. Ray tracing from LED module

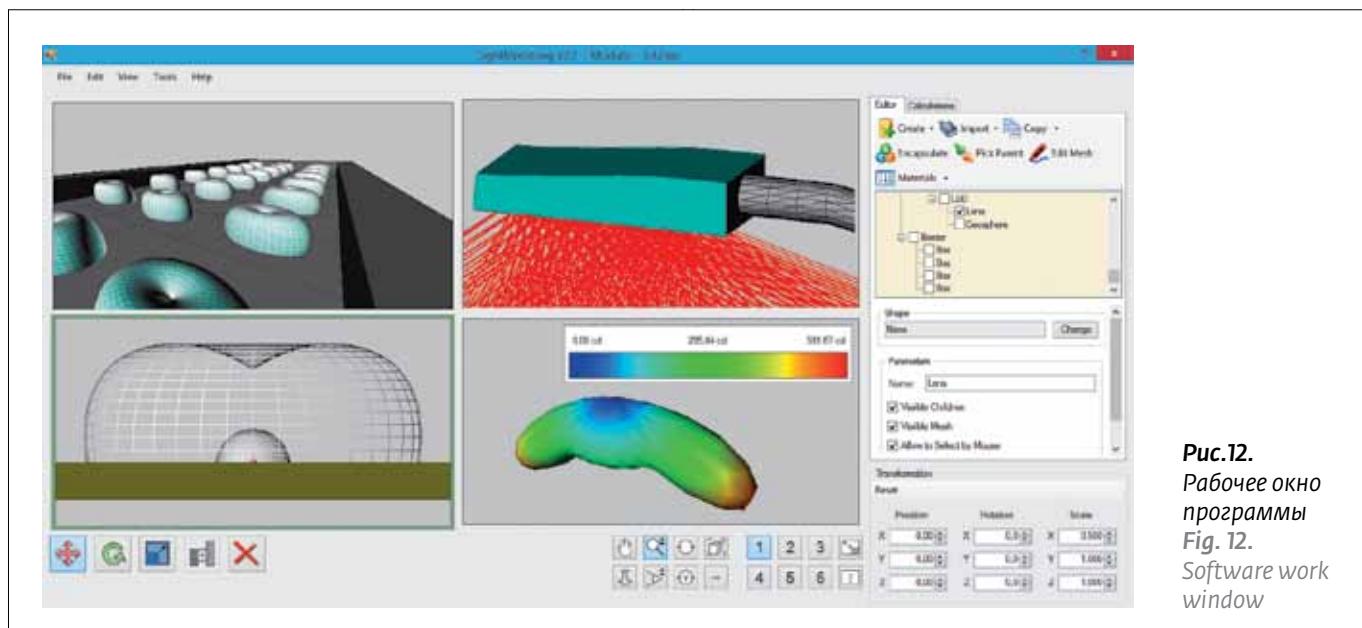


Рис.12.
Рабочее окно
программы
Fig. 12.
Software work
window

2. **Bayneva I.I.** Study and review of optical systems for light emitting diodes.– International Journal of Pharmacy & Technology, 2016, v. 8, № 3, p.5304–15309.
3. **Байнев В.В., Байнева И.И.** Оптические системы для светодиодов.– Фотоника, 2016, № 2(56), с.84–93.
4. **Fournier F.R., Cassarly W.J., Rolland J.P.** Fast freeform reflector generation using source-target maps.– Optics Express, 2010, v. 18, № 5, p.5295–5304.
5. **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.
6. **Байнева И.И., Байнев В.В.** Применение программ оптического моделирования в учебной и научной деятельности.– Информатизация образования и науки, 2015, № 4(28), с.53–62.
7. **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.
8. **Bayneva I.I.** Concerns Of Design Of The Energy-Efficient Fixtures. International Journal of Applied Engineering Research. 2015, v.10, № 3, p. 6479–6487. DOI: 10.3923/jeasci.2016. 701.704.

developed program complex allows considerably simplifying the process of designing optical LED systems and improving their quality. In this software package, the light device as a complex product is viewed in the form of a hierarchical structure of parent and descending nodes, which geometry is modeled, using triangulation grids. To smooth the surface of the optical element and the photometric body, an edge was introduced as an additional element of the triangulation grid. This triangulation grid assignment makes it possible to substantially simplify the process of smooth surfaces approximation. Also, the formation of the resulting model was realized in the developed software using basic forms and logic tree, thus ensuring synchronism of changing the forms of the same type elements. Using this software package, we simulated LED secondary optics by developing surface models, ray tracing for a given type of surface with obtaining a photometric body.