
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

COMPUTER SIMULATION AND DESIGN AUTOMATION

УДК 535.8
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-11-936-949

МЕТОДИКА ЭФФЕКТИВНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТОРАСSEИВАЮЩИХ СВОЙСТВ

В. Г. Соколов*, И. С. Потемин, Д. Д. Жданов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
**sokolovv1969@gmail.com*

Аннотация. Рассматривается проблема компьютерного моделирования оптической системы со светорассеивающими элементами. Корректное моделирование устройств с такими элементами требует выполнения длительных световых расчетов с использованием стохастических трассировщиков лучей. Представлен подход к эффективному моделированию подобных установок на примере запатентованного устройства, предназначенного для измерения двунаправленной функции рассеяния, которая используется для описания светорассеивающих свойств. Предложена реалистичная компьютерная модель устройства, позволяющая произвести расчет допусков на отклонения в позиционировании наиболее критически важных блоков устройства и произведена оценка точности измерений с учетом допусков. Результаты моделирования измерений двунаправленных функций представлены в форме графиков и синтезированных изображений.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, двунаправленная функция рассеяния, двунаправленная функция отражения, двунаправленная функция пропускания

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-11-00145.

Ссылка для цитирования: Соколов В. Г., Потемин И. С., Жданов Д. Д. Методика эффективного компьютерного моделирования устройства измерения светорассеивающих свойств // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 11. С. 936—949. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-11-936-949.

METHODOLOGY FOR EFFECTIVE COMPUTER MODELING OF A DEVICE FOR MEASURING LIGHT SCATTERING PROPERTIES

V. G. Sokolov*, I. S. Potemin, D. D. Zhdanov

ITMO University, St. Petersburg, Russia
sokolovv1969@gmail.com

Abstract. The problem of computer simulation of an optical system with light scattering elements is considered. Correctly modeling devices with such elements requires lengthy light calculations using stochastic ray tracers. An approach to efficient modeling of such installations is presented using the example of a patented device designed to measure the bidirectional scattering function, which is used to describe light scattering properties. A realistic computer model of such a device is proposed, which makes it possible to calculate tolerances for deviations in the positioning of the most critical device blocks, and an assessment of the accuracy of its measurements is carried out. Results of measurement simulations of bidirectional functions are presented in the form of graphs and synthesized images.

Keywords: computer simulation, bidirectional scattering distribution function, bidirectional reflectance distribution function, bidirectional transmittance distribution function

Acknowledgments: this work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-11-00145.

For citation: Sokolov V. G., Potemin I. S., Zhdanov D. D. Methodology for effective computer modeling of a device for measuring light scattering properties. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 11. P. 936—949 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-11-936-949.

Введение. Двухнаправленная функция рассеяния (ДФР) является одним из основных способов задания оптических свойств светорассеивающих объектов, таких как поверхности с микрошероховатостями, диффузные пленки, покрытия с объемными микроструктурами (краски, чернила) и др. [1—4]. Способ ее получения — оптические измерения. На современном рынке представлено множество различных установок для измерения ДФР [5—11]. Кроме того, в настоящее время активно ведется их разработка, что обуславливает важность виртуального прототипирования подобных измерительных устройств, необходимого для определения параметров их компонентов, расчета допусков и оценки точности измерений, которая может быть достигнута для проектируемой схемы. Двухнаправленная функция рассеяния описывает угловое распределение света, рассеянного образцом, в зависимости от направления наблюдения и в общем случае должна быть определена во всем угловом пространстве освещения и наблюдения с учетом спектрального преобразования светового излучения. Иными словами, ДФР является многомерной функцией, требующей длительных расчетов для ее полного определения. Рассеивающие образцы могут иметь различные свойства, от близких к диффузным до зеркальных, и в случае последних требуется очень высокое угловое разрешение фотоприемного блока установки для измерений ДФР. Такие модели имеют низкую эффективность, так как приемниками устройства регистрируется лишь малая часть рассеянного светового потока по отношению к общему световому потоку, излучаемому источником света устройства. С другой стороны, оценка допусков на отклонения элементов устройства требует многочисленных расчетов при определении взаимного влияния множества параметров различных блоков устройства. Следует учитывать также, что для оптических расчетов систем с рассеивающими элементами применяются довольно медленные методы стохастической трассировки лучей. Все перечисленные проблемы крайне усложняют эффективное виртуальное прототипирование подобных устройств. В настоящей статье представлен подход к эффективному моделированию подобных установок на примере оптической схемы запатентованного высокоточного устройства для измерения ДФР [12].

Измерительная установка. Установка, оптическая схема которой представлена на рис. 1, содержит следующие основные элементы: блок образца 1, осветительный блок 2, коррекционный блок 3, блок поворотных зеркал 4 и приемный блок 5.

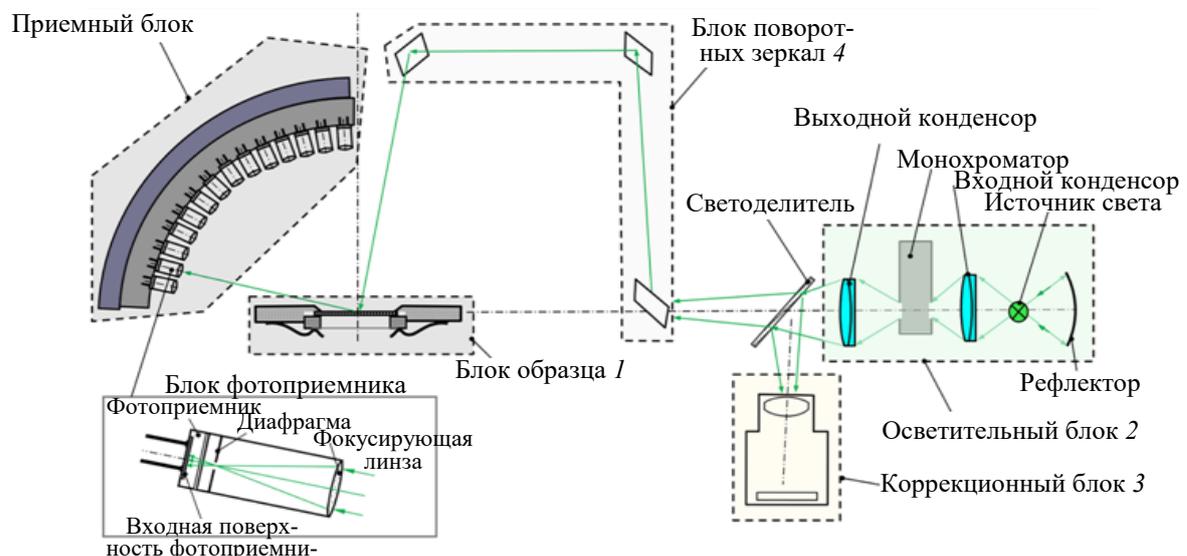


Рис. 1

Блок образца 1 используется для точного позиционирования измеряемого образца в пространстве, а также обеспечивает модификацию азимутального направления освещения образца с помощью вращения вокруг вертикальной оси. Основная функция осветительного блока 2 — освещение измеряемого образца монохромным пучком, близким к параллельному. Белый свет, излучаемый источником света, проецируется с помощью рефлектора сферической формы и входного линзового конденсора на входную щель монохроматора. Свет, излучаемый выходной щелью монохроматора в узком спектральном интервале, проходя через блок поворотных зеркал, проецируется на образец. Блок поворотных зеркал 4, вращающийся вокруг оптической оси осветительного блока, позволяет изменять полярный угол направления освещения образца. Приемный блок 5, предназначенный для детектирования рассеянного образцом света, состоит из набора фотоприемных узлов, размещенных на дуге в четверть окружности, которые и детектируют рассеянный свет. Для обеспечения детектирования рассеянного света в угловом пространстве дуга с фотоприемными узлами имеет возможность азимутального вращения вокруг вертикальной оси. Для повышения углового разрешения измерений дуга с фотоприемными узлами может вращаться (качаться) в полярном направлении в пределах углового шага между соседними фотоприемными узлами.

Оптическая схема прибора предусматривает дополнительный контроль флуктуаций светового потока, излученного источником света, с помощью коррекционного блока 3. Для обеспечения этой функциональности часть света, излучаемого осветительным блоком, перенаправляется с помощью светоделителя в коррекционный блок. Отметим, что при моделировании коррекционный блок не рассматривается вообще, так как для компьютерной модели не существует проблемы флуктуаций излучения светового потока источником света. Блок фотоприемного узла, оборудованный фокусирующей линзой, диафрагмой с переменным диаметром и фотодиодом, позволяет детектировать свет с высоким угловым разрешением в пределах от $0,5$ до $2,5^\circ$.

Для лучшего понимания работы устройства далее рассмотрена динамика функционирования его отдельных блоков (рис. 2).

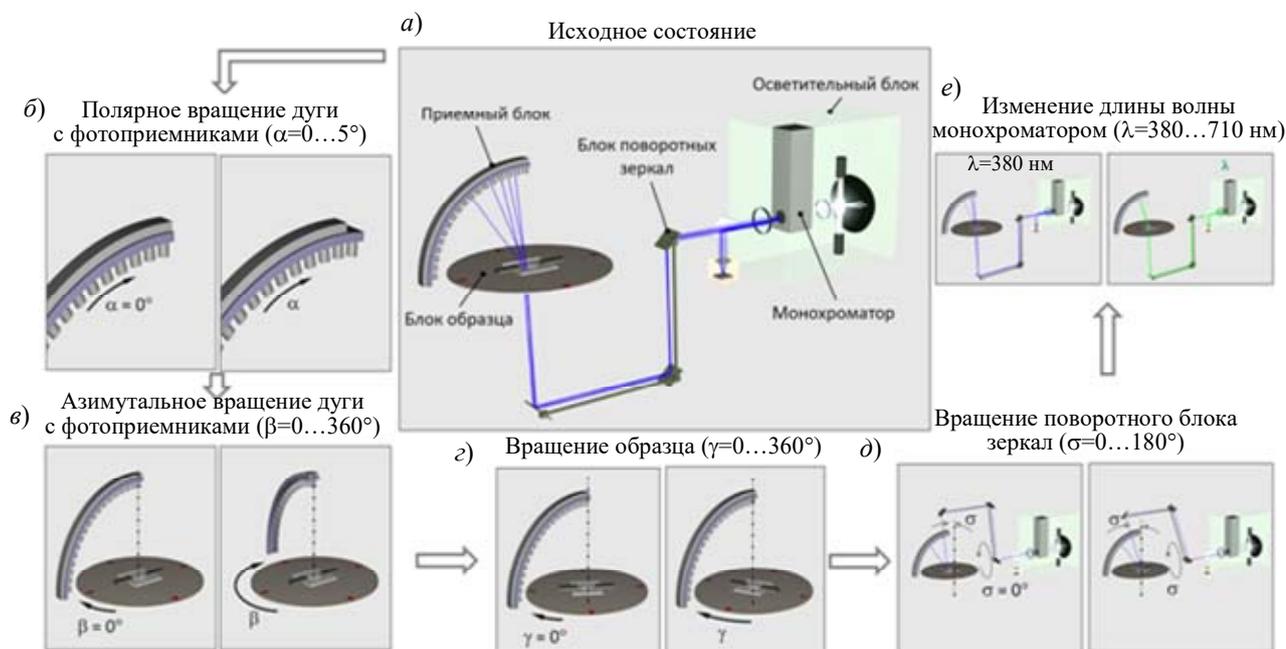


Рис. 2

На рис. 2, а показана оптическая схема устройства в статике с некоторым исходным положением всех подвижных узлов и трассировкой лучей. Полярное вращение дуги фотоприемника (рис. 2, б) запускается для измерений с высоким угловым разрешением, когда

свойства образцов близки к зеркальным. На следующем шаге (рис. 2, в) осуществляется азимутальный поворот фотоприемников вокруг вертикальной оси для охвата измерениями всего углового пространства. При измерениях образца с изотропным рассеянием диапазон изменения угла β составляет $0...180^\circ$, а при измерениях анизотропных образцов диапазон расширяется до 360° . Следующие два поворота предназначены для изменения направления освещения. На рис. 2, г показан поворот блока образца вокруг вертикальной оси на угол γ , диапазон этого поворота, необходимого только при измерении анизотропных образцов, составляет $0...360^\circ$. Вращение зеркального блока, задающее полярный угол освещения σ , представлено на рис. 2, д. При измерении двунаправленной функции отражения (ДФО) угол σ изменяется в диапазоне $0...90^\circ$, а при измерении двунаправленной функции пропускания (ДФП) — в диапазоне $90...180^\circ$. Завершающий этап схемы измерения — изменение длины волны монохроматором (рис. 2, е), длина волны изменяется в видимом диапазоне от 380 до 710 нм.

Для вычисления ДФР согласно приведенной схеме измерений во всем угловом пространстве освещения и наблюдения и широком диапазоне длин волн видимой части спектра необходимо выполнить, как было указано, огромное количество вычислений. Все связанные с этим проблемы были учтены в процессе построения компьютерной модели, представленной далее.

Оптическая схема компьютерной модели. Для оптического моделирования устройств со светорассеивающими элементами используются достаточно сложные и малоэффективные алгоритмы стохастической трассировки лучей. Некоторые проблемы, связанные с моделированием подобных устройств, изучались на компьютерных моделях реальных измерительных систем: например, в [13, 14] содержатся рекомендации по выбору оптимальных трассировщиков лучей и введению обоснованных упрощений, которые могут быть использованы при разработке компьютерной модели без внесения значительных погрешностей, влияющих на точность и достоверность результатов моделирования. Эти рекомендации были использованы при разработке компьютерной модели измерительной установки. Принципиальная оптическая схема установки для измерений ДФР представлена на рис. 3 (все размеры на рисунке приведены в миллиметрах). Компьютерная модель включает все основные блоки устройства, а именно блок образца, осветительный и приемный блоки, блок поворотных зеркал.

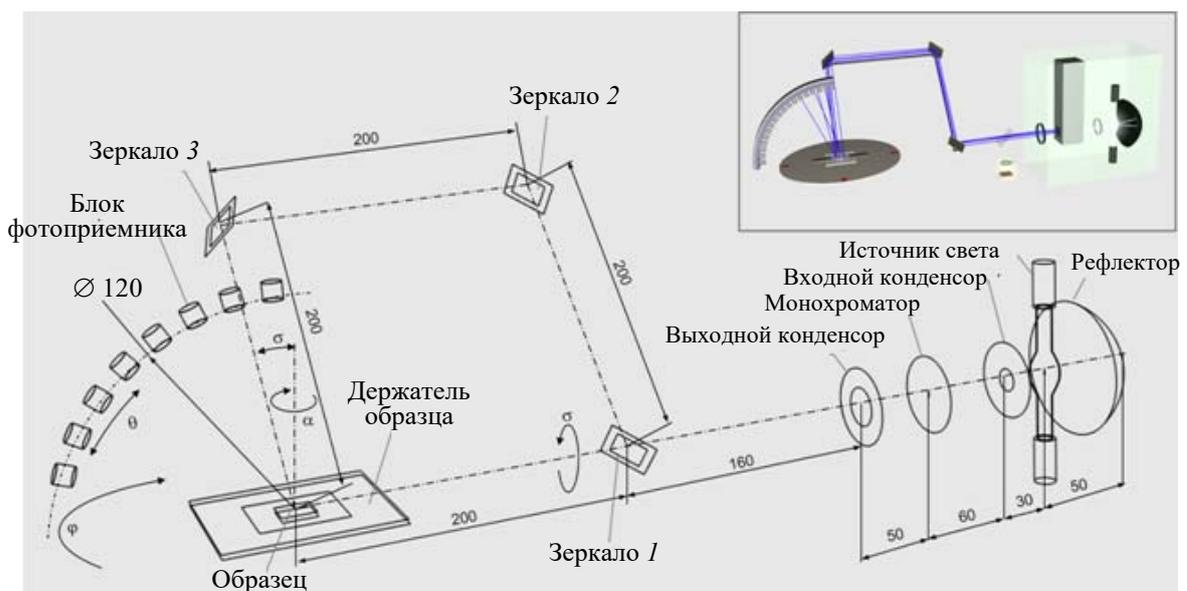


Рис. 3

Блок образца представлен в упрощенном виде несколькими элементами: однослойной плоской поверхностью с двумя прямоугольными рамками, расположенными над и под образцом с квадратными отверстиями. Плоскость используется в качестве образца, рассеивающие свойства которого и необходимо промоделировать с помощью компьютерной модели, а прямоугольные рамки моделируют элементы фиксации образца. Образец в модели можно повернуть вокруг вертикальной оси на угол α для изменения азимута направления освещения, что необходимо при измерении анизотропных образцов.

Блок поворотных зеркал моделируется простым набором трех квадратных плоских поверхностей с зеркальными свойствами (зеркала 1, 2, 3 на рис. 3). Зеркала поворотного блока неподвижны относительно друг друга, но сам блок может поворачиваться на угол σ вокруг оси, образованной нижней стороной квадрата, содержащего образец и зеркало 1, и совпадающей с оптической осью осветительного блока. Этот поворот обеспечивает плавное линейное изменение полярного угла падения света на образец. Коэффициент отражения зеркал был установлен равным 95 %, что соответствует стандартным отражающим покрытиям, применяемым в оптическом приборостроении.

Осветительный блок представлен источником света, рефлектором сферической формы, входным конденсором, монохроматором и выходным конденсором. В качестве источника света выбрана модель ксеноновой лампы [15]. Модель лампы представлена с помощью стеклянной колбы, патронов и основного объекта (эффективного размера дуги) — самосветящегося цилиндрического тела радиусом 0,5 мм и длиной 2,2 мм. Спектрограмма излучения и световой поток заданы в соответствии со спецификацией, предоставленной производителем реальной лампы. Ламповый рефлектор имеет сферическую форму с центром кривизны, помещенным в центр светящейся дуги лампы. Рабочая поверхность рефлектора имеет коэффициент зеркального отражения, равный 95 %. Для ускорения расчета все линзы в модели представлены идеальными линзами. Моделируемое устройство не относится к классу изображающей оптики, поэтому не нуждается в точном воспроизведении реального изображения.

В качестве монохроматора в устройстве используется готовое изделие — минимонохроматор с дифракционной решеткой [16]. Реальное моделирование такого прибора с учетом волновых эффектов является экстремально сложной задачей, поэтому здесь также используется упрощенная модель с непрозрачной диафрагмой прямоугольной формы, размер которой совпадает с входной/выходной щелью реального монохроматора. Прямоугольная щель моделируется прозрачной поверхностью, спектральный интервал пропускания которой может варьироваться произвольно. Для ускорения расчета этот интервал в моделировании совпадает со всем видимым диапазоном, равным 380...710 нм, т.е. все длины волн рассчитываются одновременно, так как используемый трассировщик лучей имеет такую возможность.

Модель приемного блока была разработана в двух вариантах: более близком к „реальному“ и упрощенном. В „реальном“ варианте блоки фотоприемников (рис. 4, а) состоят из идеальных фокусирующих линз 1, оправы 2, диафрагмы 3 с переменным диаметром и детектора светового потока 4. Детекторы распределены по дуге окружности, как и в реальной схеме устройства, их количество задается сеткой полярных углов, имеется дополнительная возможность их полярного вращения и азимутального вращения вокруг вертикальной оси.

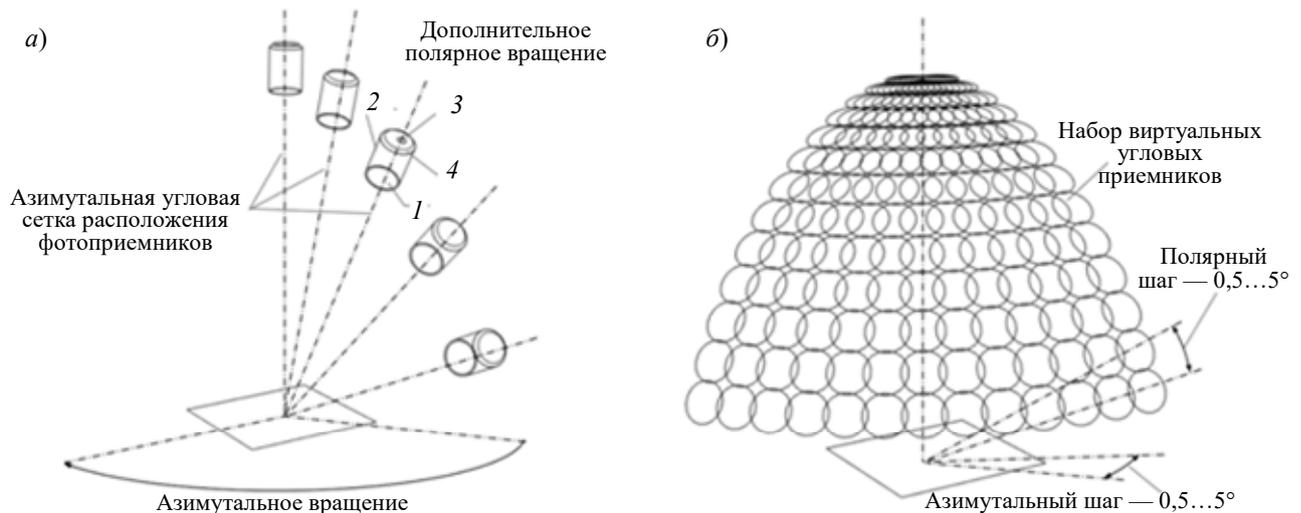


Рис. 4

Однако моделирование измерений ДФР во всем угловом пространстве на основе такой „реальной“ модели приемного блока с последовательными азимутальными поворотами и полярными сдвигами в случае использования высокого разрешения крайне малоэффективно. Вследствие этого „реальная“ модель приемного блока использовалась только для тестирования. Для моделирования ДФР, определенной на полной и детальной угловой сетке, был создан второй упрощенный вариант модели приемного блока (рис. 4, б). В этом варианте приемный блок представлен набором виртуальных детекторов круглой формы диаметром 5 мм и переменным угловым разрешением в пределах 0,5...2,5°, соответствующим входной спецификации моделируемого устройства. Детекторы не влияют на распространение света в системе и могут быть установлены в любом количестве с произвольным угловым шагом как в азимутальном, так и в полярном направлении, их пересечение также не влияет на распространение рассеянного света; таким образом, все направления наблюдения, используемые при измерениях, можно вычислить одновременно. Такой подход возможен только при использовании прямых трассировщиков лучей, не зависящих от наблюдателя (камеры) [18].

Методика вычисления ДФР в компьютерной модели. При известных яркостях измеряемого образца и эталона (образца с известной ДФР) для заданных направлений освещения, наблюдения и длины волны [18] ДФР может быть определена в соответствии с формулой

$$K(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \lambda) = \frac{L_{\text{sample}}(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \lambda)}{L_{\text{etalon}}(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \lambda)} K_{\text{etalon}}(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \lambda), \quad (1)$$

где $K(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \lambda)$ — коэффициент яркости для данных направлений освещения и наблюдения, определяемых векторами \mathbf{i} и \mathbf{o} соответственно, и данной длины волны λ , а угловое и спектральное распределение коэффициента яркости и будет определять ДФР; $L_{\text{sample}}(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \lambda)$, $L_{\text{etalon}}(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \lambda)$ — яркости (или световые потоки) образца и эталона, измеренные при одинаковых условиях наблюдения и освещения; K_{etalon} — известный коэффициент яркости эталона.

Как правило, в качестве эталона используется образец с рассеивающими свойствами, близкими к идеальным равномерным по всем направлениям наблюдения, ДФР которого известна. При компьютерном моделировании можно использовать просто идеальные ламбертовские свойства с единичным коэффициентом яркости для всех длин волн и направлений наблюдения и освещения.

Для ускорения процесса вычислений ДФР при компьютерном моделировании важно выбрать оптимальный метод светового расчета. Следует отметить, что в настоящее время существует достаточно много эффективных методов, разработанных для расчета светорассеяния,

однако в большинстве из них используются гибридные формы прямой (от источника света) и обратной (от наблюдателя, камеры) трассировки лучей. Методы обратной трассировки не позволяют производить вычисления для нескольких направлений наблюдения одновременно. Вследствие этого был выбран достаточно простой и известный метод прямой стохастической трассировки лучей Монте-Карло, который позволяет рассчитывать неограниченное число виртуальных детекторов (см. рис. 4, б) и доступен в программном комплексе Lumiscept [19], используемом для моделирования в данной работе.

Еще одной задачей при расчете ДФР является приведение системы координат, в которой определена эта функция, к требуемому типу. В компьютерной модели положение детектора определяется в обычной геоцентрической системе координат, где направление наблюдения задается двумя углами: азимутальным α и полярным β . Однако при использовании Lumiscept [20] ДФР вычисляется в более сложной системе координат, как показано на рис. 5, где ДФР определяется относительно зеркально отраженного луча в случае ДФО и преломленного луча в случае ДФП, направление наблюдения задается углами θ и φ . Угол θ — это угол между направлением зеркального отражения \mathbf{r} и направлением наблюдения \mathbf{o} , а угол φ определяет поворот направления наблюдения вокруг направления зеркального отражения. Таким образом, данные, рассчитанные в исходной геоцентрической системе координат компьютерной модели (углы α , β), должны быть преобразованы в σ , θ , φ .

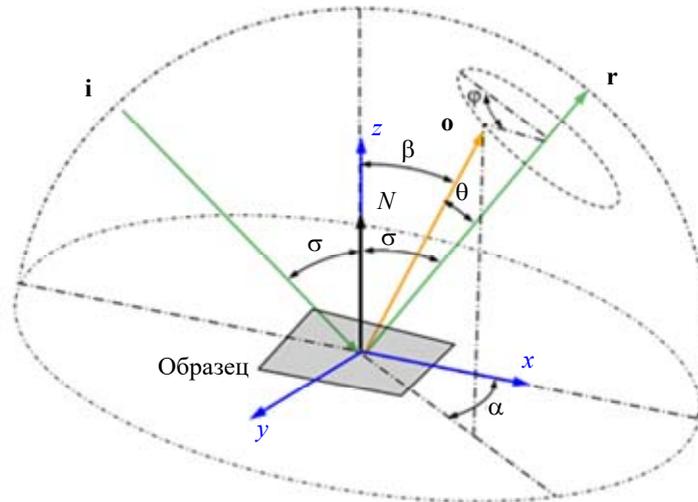


Рис. 5

По рис. 5 можно определить углы α , β при известных (o_x, o_y, o_z) ортах вектора наблюдения \mathbf{o} по следующей формуле:

$$\alpha = \arctg 2(o_x/o_y); \quad \beta = \arccos \left(\frac{\sqrt{o_x^2 + o_y^2}}{|\mathbf{o}|} \right). \quad (2)$$

Орты вектора \mathbf{o} легко вывести для случая нормального освещения образца под углом $\sigma = 0^\circ$:

$$o'_x = \cos \theta; \quad o'_y = \sin \theta \sin \varphi; \quad o'_z = \sin \theta \cos \varphi. \quad (3)$$

Выполнив поворот на требуемый угол σ , можно получить значения ортов вектора наблюдения \mathbf{o} для общего случая с ненулевым σ :

$$\begin{bmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \sigma & 0 & -\sin \sigma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \sigma & 0 & \cos \sigma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} o'_x \\ o'_y \\ o'_z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

По формулам (2) и (4) можно определить углы α и β как функции от σ , θ и φ и привести расчетную ДФР к требуемой угловой сетке. Общий алгоритм расчета ДФР в компьютерной модели представлен на рис. 6.

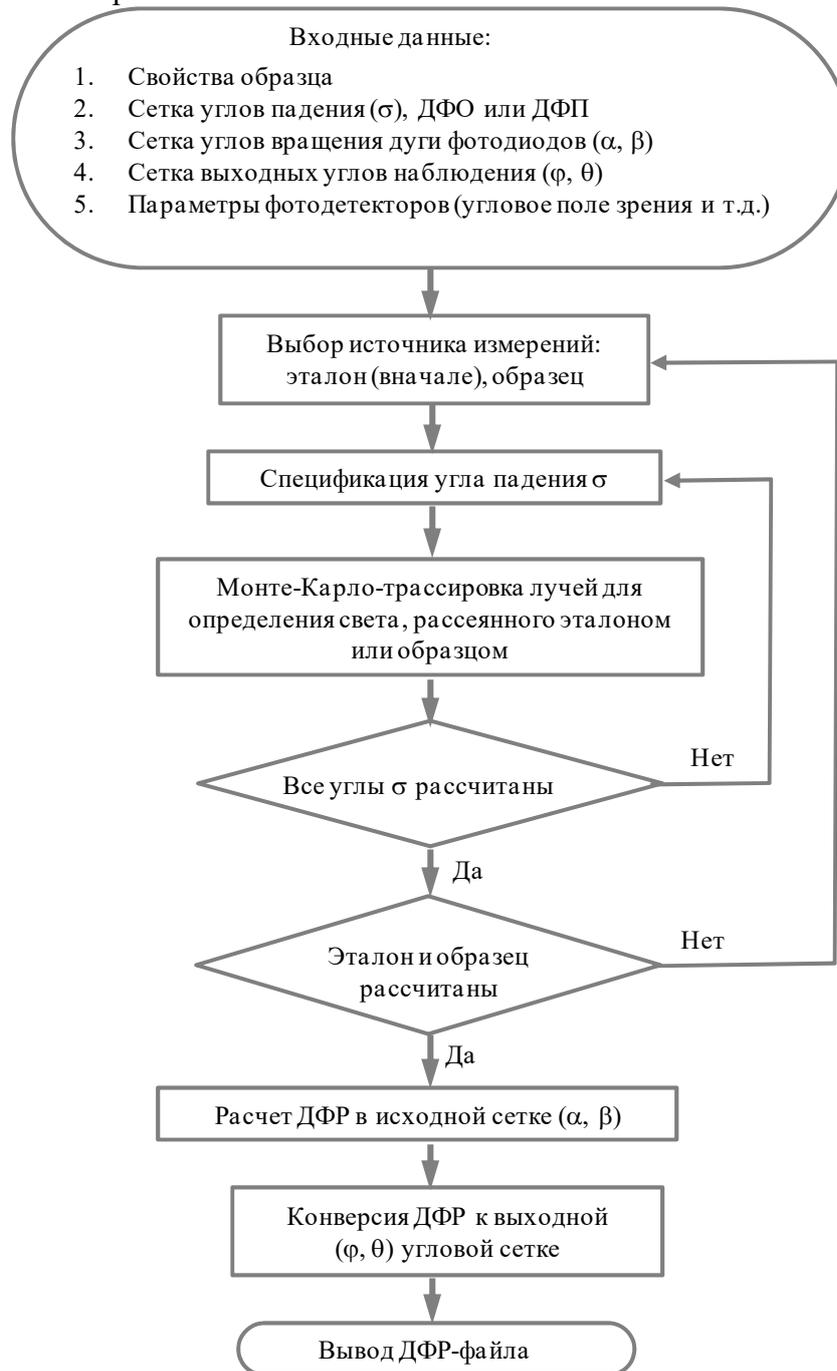


Рис. 6

Для расчета ДФР на поверхности образца задаются исследуемые свойства рассеяния. Кроме того, задаются сетка углов падения света σ для определения условий освещения образца, сетка углов α , β , определяющая полный набор положений виртуальных детекторов, и сетка выходных углов φ , θ . Сначала задаются свойства диффузного эталона (ДФР) с единичным коэффициентом яркости. Положение зеркального блока задается по начальному углу σ , а положение детекторов — по сеткам углов α и β . Затем выполняется расчет световых потоков, создаваемых рассеянным светом на детекторах, с помощью трассировки лучей методом Монте-Карло. Расчеты повторяются для всех углов σ с соответствующим поворотом зеркального узла.

После выполнения всех расчетов для эталона та же процедура повторяется для рассеивающих свойств исследуемого образца. Далее эти световые потоки пересчитываются в распределение коэффициента яркости по формуле (1) с последующим преобразованием к сетке углов σ , φ , θ с помощью формул (2)—(4) и сохранением в файл с ДФР.

Оптимизация компьютерной модели для расчета допусков. Устройство, предназначенное для измерения ДФР, содержит много подвижных элементов, отклонение параметров которых может существенно влиять на точность измерений. Оценка допусков в таком устройстве предполагает выполнение многочисленных расчетов. Для решения проблемы ускорения вычислений использована декомпозиция модели, основная идея которой — разделение модели на две части: осветительный блок и остальные элементы. Основными выходными характеристиками осветительного блока (рис. 7) являются значение освещенности и равномерность освещения, создаваемого на поверхности образца, и угловая расходимость пучка освещения. Угловая расходимость пучка определяется в большей степени расстоянием между выходным зрачком осветительного блока и поверхностью образца, повлиять на это расстояние без кардинального изменения схемы прибора практически невозможно.

Угловые и пространственные отклонения осветительного блока представлены на рис. 8.

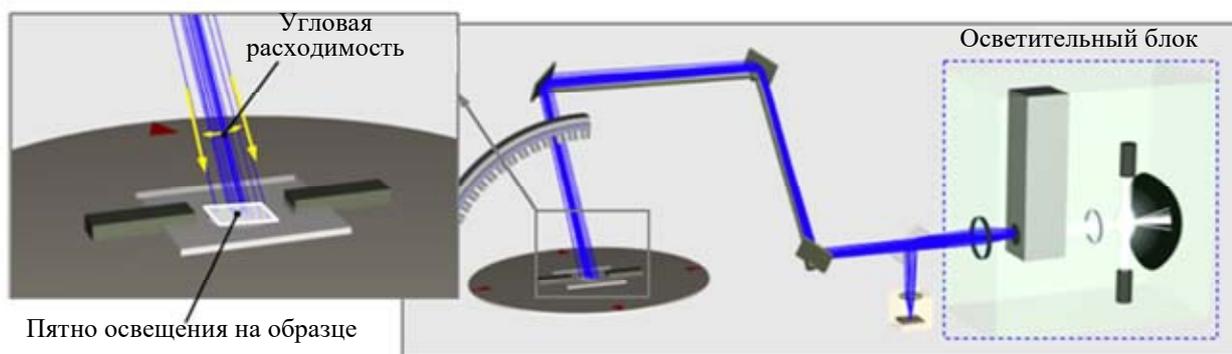


Рис. 7

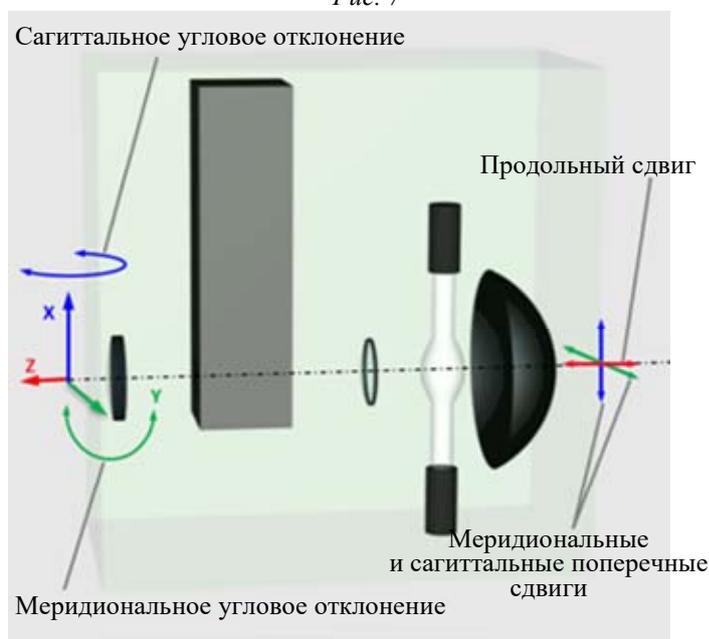


Рис. 8

Подобные отклонения в позиционировании можно выделить и для отдельных элементов осветительного блока: конденсоров, лампы, лампового рефлектора, все эти отклонения использовались при оценке допусков. Допуски для элементов осветительного блока рассчитывались исходя из условия, что световой поток, падающий на образец, расположен в его центре и имеет размеры не менее 5×5 мм, не отличающиеся более чем на 5—10 % от значе-

ния, рассчитанного для нулевых отклонений. Расчет допусков выполнялся по стандартному алгоритму. Допустимые угловые и пространственные отклонения (только минимальные значения) представлены в табл. 1. В основном эти отклонения относятся к позиционированию лампового рефлектора, всего осветительного блока и выходного конденсатора. Допуски для других элементов более грубые.

Таблица 1

Устройство	Угловые отклонения, ...°	Пространственные отклонения, мм
Осветительный блок	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$
Остальные элементы	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$

В дальнейших расчетах для ускорения вычислений при моделировании всего устройства осветительный блок подсветки был заменен на лучевой источник света („Rayset“ в терминологии Lumiscept [20]). Этот источник воспроизводит полностью угловое и пространственное распределение света, излучаемое осветительным блоком, и представляет собой набор лучей, записанных на выходе осветительного блока (выходном конденсоре). Запись лучей производится при наихудшем сочетании отклонений элементов осветительного блока. При использовании лучевого источника света трассировка лучей стартует от выходного конденсатора, а не от источника света, что многократно ускоряет процесс вычислений при сохранении корректности моделирования устройства в целом. Для примера, вычисление одной ДФР в исходной модели с „реальной“ моделью фотоприемников (см. рис. 4, а) и полной трассировкой лучей от источника света (без замены осветительного блока на лучевой источник света) занимает на достаточно мощном компьютере с процессором „AMD EPYC 7281 16-Core Processor, 2100 Mhz, 16 Core(s), 16 Logical Processor(s)“ около недели, а в финальной компьютерной модели, представленной на рис. 9, — около 1 мин.

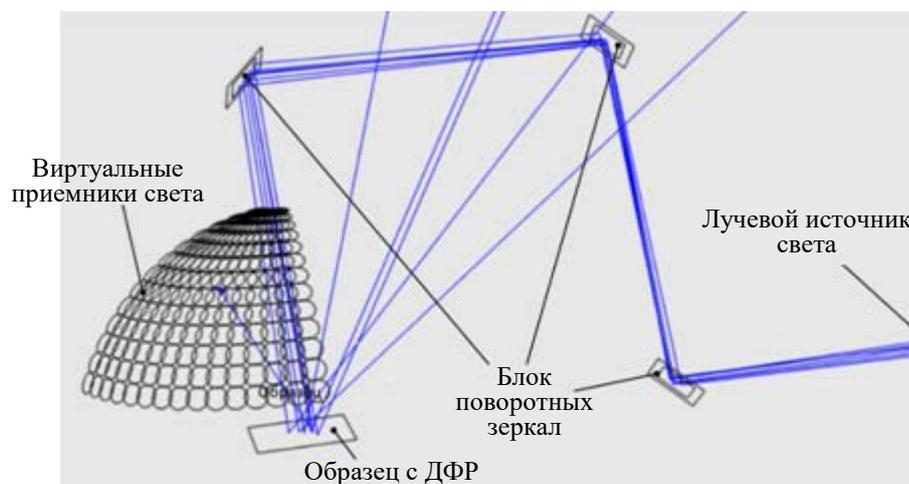


Рис. 9

Аналогично угловым и пространственным отклонениям осветительного блока (см. рис. 8) подобные отклонения были выделены в позиционировании других элементов устройства: образца, поворотного блока зеркал, дуги с фотоприемными узлами приемного блока и отдельно фотоприемных узлов. При расчете допусков вместо освещенности образца использовалось отклонение между теоретической и моделированной ДФР. В качестве теоретической ДФР было выбрано гауссовское распределение с угловой шириной 2° (эта функция рассматривается далее), а отклонение между теоретической и моделируемой ДФР вычислялось как относительное среднеквадратическое отклонение, определяемое формулой

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i \left(\frac{L_{si} - L_{ti}}{0,5(L_{si} + L_{ti})} \right)^2}{n}} \cdot 100 \%, \tag{5}$$

где L_{si} — значение ДФР (коэффициента яркости), вычисленное с помощью компьютерной модели; L_{ti} — значение теоретической ДФР, индекс „ i “ определяет направление наблюдения и освещения; n — общее количество значений коэффициента яркости в ДФР для всех комбинаций направлений наблюдения и освещения; при расчете ДФР использовался 5%-ный порог, который не должен превышать RMSE.

Допуски на угловые и пространственные сдвиги элементов блока образца, блока поворотных зеркал, дуги с фотоприемниками также представлены в табл. 1. Как и в случае с осветительным блоком, здесь представлены только наиболее жесткие отклонения, критичные для некоторых элементов устройства типа зеркал поворотного блока. Оценка точности устройства производилась с учетом допусков — при худшей комбинации отклонений параметров устройства в целом.

Результаты моделирования. Для оценки точности устройства с помощью разработанной компьютерной модели, как и в случае оценки допусков, было выбрано распределение Гаусса:

$$I(\theta) = I_o \exp\left(-\left(\frac{\theta}{\zeta}\right)^2\right),$$

где ζ — угловая ширина (угол, при котором сила света I уменьшается вдвое по отношению к силе света I_o в зеркальном направлении).

Для исследования были выбраны два варианта гауссовой ДФО с угловой шириной 2 и 15°. Первый вариант функции соответствует зеркальным рассеивающим свойствам, второй вариант представляет более диффузные свойства. Результаты моделирования приведены на рис. 10: $a, б$ — сравнительные графики ДФО, полученных в результате моделирования, и их теоретических аналогов.

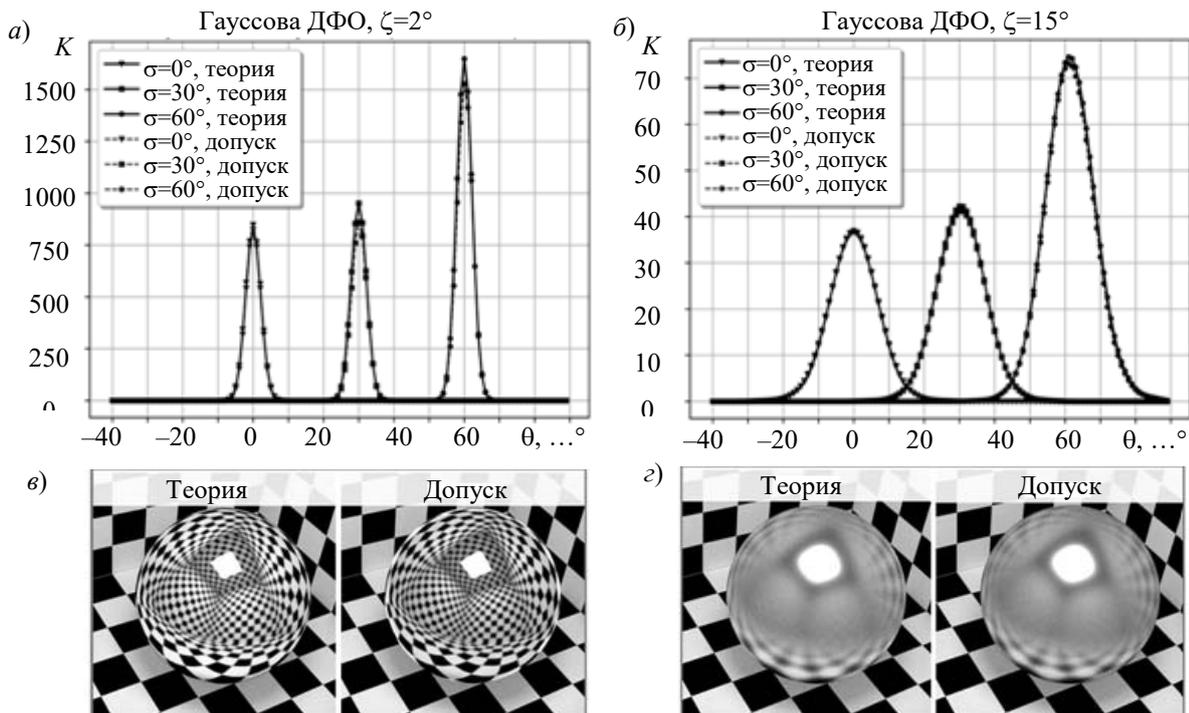


Рис. 10

Все расчеты проводились для минимального углового поля зрения фотоприемного узла, равного $0,5^\circ$. На графиках показано распределение коэффициента яркости, приведенное для трех углов освещения $\sigma = 0, 30, 60^\circ$ в плоскости падения света (их максимумы смещены вдоль оси абсцисс). На рис. 10, в, г представлены изображения, предназначенные для визуального сравнения, — они синтезированы для сферы со свойствами ДФР (теоретическими и смоделированными), помещенной в куб с шахматными гранями и освещенной прямоугольным источником света. Численные результаты сравнения в форме среднеквадратического отклонения, вычисленного по формуле (5), представлены в табл. 2.

Таблица 2

Угол освещения σ, \dots°	RMSE, %, при	
	$\zeta = 2^\circ$	$\zeta = 15^\circ$
0	4,79	0,37
30	4,21	0,56
60	3,85	0,74

Как показывает анализ рис. 10, графики смоделированных ДФО практически совпадают с теоретическими, те же выводы можно сделать по визуальному сравнению синтезированных изображений.

Отклонение между смоделированной и теоретической ДФР не превышает порог в 5 % даже для сложной узконаправленной ДФО.

Заключение. Устройства измерений двунаправленных функций рассеяния чрезвычайно не эффективны с точки зрения светового моделирования вследствие малых угловых и пространственных апертур приемников света. Представленные в статье методы компьютерного моделирования, такие как одновременный расчет множества детекторов света, прямая трассировка лучей методом Монте-Карло, декомпозиция модели с отдельным расчетом осветительного блока и его последующей заменой лучевым источником света, позволяют существенно (более чем в 100 раз) ускорить оптические вычисления, необходимые для расчета допусков и анализа точности исследуемого устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bartell F. O., Dereniak E. L., Wolfe W. L., The Theory and Measurement of Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) And Bidirectional Transmittance Distribution Function (BTDF) // Proc. SPIE 0257, Radiation Scattering in Optical Systems, 3 March 1981. DOI: org/10.1117/12.959611.
2. Torrance K., Sparrow E. Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces // J. Optical Soc. Amer. 1976. Vol. 57. P. 1105—1114.
3. Ward J. G. Measuring and modeling anisotropic reflection // Proc. of SIGGRAPH. 1992. P. 265—272. DOI: 10.1145/133994.134078.
4. Blinn J. F. Models of light reflection for computer synthesized pictures // Proc. 4th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques. 1977. P. 192. DOI: 10.1145/563858.563893.
5. X-Rite MA98 Portable Multi-Angle Spectrophotometers, X-Rite [Электронный ресурс]: <https://www.tricolor.pl/images/pdf/L10-372_MA98_en.pdf>, 7.11.2023.
6. MA-T12 Handheld Multi-Angle Spectrophotometer | X-Rite 12-Angle Color Measurement, X-Rite [Электронный ресурс]: <<https://www.xrite.com/categories/portable-spectrophotometers/ma-family/ma-t12>>, 7.11.2023.
7. Optical Scattering Measurement & Equipment | Synopsys, Synopsys Mini-Diff VPro, SYNOPSIS, [Электронный ресурс]: <<https://www.synopsys.com/optical-solutions/scattering-measurements.html#MiniDiffVPRO>>, 7.11.2023.
8. Imaging Sphere for Scatter and Appearance Measurement IS-SA, Radiant Vision Systems, [Электронный ресурс]: <<https://sphereoptics.de/wp-content/uploads/2014/03/Radiant-ImagingSphere-IS-SA.pdf>>, 7.11.2023.
9. Ansys Optical Measurement Device Solutions, ANSYS AMO-PRO, AMO-Premium, Ansys [Электронный ресурс]: <<https://www.ansys.com/content/dam/product/optical/omd/ansys-omd-technical-description-sheet.pdf>>, 7.11.2023.

10. Gonio Photometer GP-700 | Murakami Color Research Laboratory [Электронный ресурс]: <https://www.mcrl.co.jp/english/products/p_color_sp/detail/GP700.html>.
11. Gonio-Spectrophotometric Color Measurement System GCMS-4B, [Электронный ресурс]: <https://www.mcrl.co.jp/english/products/p_color_sp/detail/GCMS4B.html>, 7.11.2023.
12. Пат. RU 2790949 С1. Устройство для измерения двунаправленной функции рассеяния (варианты) / В. Г. Соколов, И. С. Потемин, Д. Д. Жданов. Оpubл. 2023.02.28 [Электронный ресурс]: <<https://patents.google.com/patent/RU2790949C1/ru>>.
13. Sokolov V., Potemin I., Wang Y. Virtual prototyping of BSDF measurements for materials with complex scattering properties // Proc. of SPIE. 2021. Vol. 11876. P. 118760K.
14. Sokolov V., Potemin I., Zhdanov D. D., Barladian B. Simulation of the BSDF measurements for scattering materials with GP-200 gonio-photometer for light guiding plates // Proc. of SPIE. 2021. Vol. 11783. P. 1178305.
15. Xenon Arc Lamp, 150 W, Ozone Free, Newport [Электронный ресурс]: <<https://www.newport.com/p/6255>>, 7.11.2023.
16. Oriel mini monochromator, 2023 [Электронный ресурс]: <https://research.engineering.ucdavis.edu/woodall/wp-content/uploads/sites/84/2016/02/oriel_78025_specs.pdf>, 7.11.2023.
17. González O., Rodríguez S., Pérez-Jiménez R., Mendoza B., Ayala A. Comparison of Monte Carlo ray-tracing and photon-tracing methods for calculation of the impulse response on indoor wireless optical channels // Opt. Express. 2011. N 19. P. 1997-2005.
18. Nicodemus F. E. Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface // Appl. Opt. 1965. N 4. P. 767—775.
19. Lumiccept — Hybrid Light Simulation Software, 2023 [Электронный ресурс]: <<https://integra.jp/en/products/lumiccept>>, 7.11.2023.

Сведения об авторах

- Вадим Геннадьевич Соколов** — Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; старший научный сотрудник;
E-mail: sokolovv1969@gmail.com
- Игорь Станиславович Потемин** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; доцент;
E-mail: ipotemin@yandex.ru
- Дмитрий Дмитриевич Жданов** — канд. физ.-мат. наук; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; доцент;
E-mail: ddzhdanov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.07.2023; одобрена после рецензирования 17.08.2023; принята к публикации 27.09.2023.

REFERENCES

1. Bartell F.O., Dereniak E.L., Wolfe W.L. *Radiation Scattering in Optical Systems*, Proc. SPIE, 3 March 1981, vol. 0257, <https://doi.org/10.1117/12.959611>.
2. Torrance K. and Sparrow E. *J. Optical Soc. America*, 1976, vol. 57, pp. 1105–1114.
3. Ward J.G. *Proc. of SIGGRAPH*, 1992, pp. 265–272, doi:10.1145/133994.134078.
4. Blinn J.F. *Proc. 4th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1977, pp. 192, DOI:10.1145/563858.563893.
5. *X-Rite MA98 Portable Multi-Angle Spectrophotometers*, https://www.tri-color.pl/images/pdf/L10-372_MA98_en.pdf.
6. *MA-T12 Handheld Multi-Angle Spectrophotometer | X-Rite 12-Angle Color Measurement*, <https://www.xrite.com/categories/portable-spectrophotometers/ma-family/ma-t12>.
7. *Optical Scattering Measurement & Equipment | Synopsys, Synopsys Mini-Diff VPro*, <https://www.synopsys.com/optical-solutions/scattering-measurements.html#MiniDiffVPRO>.
8. *Imaging Sphere for Scatter and Appearance Measurement IS-SA, Radiant Vision Systems*, <https://sphereoptics.de/wp-content/uploads/2014/03/Radiant-ImagingSphere-IS-SA.pdf>.
9. *Ansys Optical Measurement Device Solutions, ANSYS AMO-PRO, AMO-Premium, Ansys*, <https://www.ansys.com/content/dam/product/optical/omd/ansys-omd-technical-description-sheet.pdf>.
10. *Gonio Photometer GP-700 | Murakami Color Research Laboratory, Murakami Color Research Laboratory*, https://www.mcrl.co.jp/english/products/p_color_sp/detail/GP700.html.
11. *Gonio-Spectrophotometric Color Measurement System GCMS-4B*, https://www.mcrl.co.jp/english/products/p_color_sp/detail/GCMS4B.html.

12. Patent RU2790949C1, *Ustroystvo dlya izmereniya dvunapravlennoy funktsii rasseyaniya (varianty)* (Device for Measuring the Bidirectional Scattering Function (Embodiments)), V.G. Sokolov, I.S. Potemin, D.D. Zhdanov, Priority 2022-07-26, Published 2023-02-28.
13. Sokolov V., Potemin I., Wang Y. *Proceedings of SPIE*, 2021, vol. 11876, pp. 118760K.
14. Sokolov V., Potemin I., Zhdanov D.D., Barladian B. *Proceedings of SPIE*, 2021, vol. 11783, pp. 1178305.
15. *Xenon Arc Lamp*, 150 W, Ozone Free, <https://www.newport.com/p/6255>.
16. *Oriel mini monochromator*, 2023, https://research.engineering.ucdavis.edu/woodall/wp-content/uploads/sites/84/2016/02/oriel_78025_specs.pdf, 7.11.2023.
17. González O., Rodríguez S., Pérez-Jiménez R., Mendoza B., and Ayala A. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, pp. 1997–2005.
18. Nicodemus F.E. *Appl. Opt.*, 1965, vol. 4, pp. 767–775.
19. *Lumicept – Hybrid Light Simulation Software*, <https://integra.jp/en/products/lumicept>.

Data on authors

- Vadim G. Sokolov** — ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; Senior Researcher; E-mail: sokolovv1969@gmail.com
- Igor S. Potemin** — PhD; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; Associated Professor; E-mail: ipotemin@yandex.ru
- Dmitry D. Zhdanov** — PhD; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; Associated Professor; E-mail: ddzhdanov@mail.ru

Received 19.07.2023; approved after reviewing 17.08.2023; accepted for publication 27.09.2023.