

ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 519.245 535.312 535.92

УЧЕТ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ ОТРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТРЕХМЕРНОМ ОБЪЕКТЕ

© 2014 г. Е. В. Класс, доктор техн. наук; В. В. Шаховский, канд. техн. наук;
К. В. Бадюк; С. А. Ульянов

Центральный научно-исследовательский институт химии и механики, Москва

E-mail: elenaklass@yandex.ru

В работе изложена методика расчета отражения оптического излучения от трехмерного шероховатого объекта в приближении геометрической оптики, использующая метод Монте-Карло. Для учета шероховатостей наряду с макромоделью объекта вводится модель микроуровня, представляющая собой подложку конечных размеров, на которой заданы неоднородности в виде тел, ограниченных поверхностями второго порядка. Исследовано влияние краевых эффектов на модель микроуровня и выбраны ее оптимальные размеры. Представлены результаты тестирования методики на экспериментах по определению отражающих свойств материалов с известной степенью случайной шероховатости и трехмерного объекта в виде биконического радиатора.

Ключевые слова: геометрическая оптика, метод Монте-Карло, статистический вес, оптическое излучение, отражение, шероховатая поверхность, двунаправленная функция отражения, трехмерная геометрия.

Коды OCIS: 080.1753, 240.5770, 290.1483

Поступила в редакцию 23.04.2013

Введение

Исторически сложились два основных подхода к расчетным исследованиям отражения оптического излучения от шероховатой поверхности: рассмотрение на основе физической оптики, базирующееся на решении волнового уравнения в приближении Кирхгофа, и корпускулярный подход, представляющий свет как набор частиц.

Отражающие свойства поверхности принято описывать с помощью двунаправленной функции отражения (ДФО), которая численно характеризует отраженное излучение в направлении θ_1 в зависимости от направления облучения θ_2 . В приближении геометрической оптики, справедливой, если размеры неоднородностей превышают длину волны излучения, основополагающей можно считать модель Торренса-Спадова [1]. В ней шероховатая поверхность представляется в виде случайно ориентированных зеркальных микрограней, образующих

V-образные канавки. Полуэмпирические выражения ДФО были получены в указанной работе с помощью достаточно наглядных геометрических рассуждений с учетом одного отражения, но при этом в аналитическом виде были представлены значения фактора геометрического ослабления, позволяющего учесть различные эффекты экранирования. Позднее, в работе Хи и Торренса [2] на основе физической оптики были получены выражения, позволяющие определять ДФО случайных неоднородностей, описываемых гладкими поверхностями, высоты и протяженность которых имеют гауссово распределение. В последние годы появилось много работ как уточняющих модели [1, 2], так и критикующих их. В частности, к недостаткам модели [1] относят нереалистичную форму поверхности, двумерность моделируемых неоднородностей и отсутствие учета многократного рассеяния. Основным недостатком модели [2] для практики является ее большая сложность. Следует отметить, что

обе приведенные модели и их более поздние модификации ориентируются на представление об объекте отражения в виде плоской шероховатой поверхности. Использование получаемых оценок для расчета отражения оптического излучения от трехмерного объекта в тех случаях, когда отраженный сигнал формируется за счет процессов многократного отражения, требует разработки дополнительных методик.

В работе [3] предложена идея, позволяющая учесть форму трехмерного объекта, имеющего шероховатые поверхности отражения. В этой работе на базе метода Монте-Карло описана так называемая “процедурная модель” TETRA, которая рассчитывает трехмерный объект на двух уровнях: как целое – на макроуровне, но при этом для каждого луча формируется микрогеометрия в виде случайной тетраэдрической “ямы”. Падающий луч, попадая в микрогеометрию, испытывает одно или несколько отражений от стен тетраэдра, а затем продолжает принимать участие в переносе излучения на макроуровне. Как отмечается авторами [3], недостатком предложенной модели является невозможность учета переноса излучения между соседними “ямами”, т.е. недостаточный учет многократного отражения.

В настоящей работе в развитие идей [3] предложено задавать геометрическую расчетную схему микроуровня в виде подложки конечных размеров, на которой размещаются неоднородности, форма которых описывается уравнениями поверхностей первого и второго порядков. Подобное представление микрогеометрии позволяет полностью учесть эффекты многократного отражения шероховатой поверхностью в приближении геометрической оптики. В целом предлагаемая методика представляет собой программу метода Монте-Карло, позволяющую проводить расчет отражения оптического излучения в трехмерном объекте с учетом шероховатости его поверхностей.

Особенности методики

Методика расчета отражения оптического излучения от трехмерного объекта с учетом шероховатости его поверхностей была разработана на базе программы метода Монте-Карло РОКС [4], предназначенной для оценки блеска космических объектов. Математическая модель программы основана на представлении оптического излучения как потока частиц – фотонов,

взаимодействующих с объектом в соответствии с законами геометрической оптики. Геометрический модуль программы использует представление трехмерного объекта в виде зон, ограниченных поверхностями второго порядка. В исходной программе константы взаимодействия ориентированы на реализацию идеального зеркального и идеального диффузного отражений и представлены в виде заранее заданной вероятности полного отражения и соответствующих парциальных вероятностей. При этом предусмотрена зависимость вероятности отражения от углов падения и отражения излучения, если имеются соответствующие экспериментальные данные, либо вычисление вероятности отражения по закону Френеля. Результаты тестирования программы на примерах модельных макрообъектов, поверхности которых обладают свойствами идеального зеркального или идеального диффузного отражателя, изложены в работе [4].

Предложенная модель учета шероховатости поверхности отражения предполагает описание объекта на двух уровнях: макроскопическом и микроскопическом. На макроуровне моделируемый объект задается целиком в виде совокупности зон, описываемых уравнениями поверхностей второго порядка. Отражающие поверхности объекта на макроуровне не имеют шероховатостей. Модель микроуровня, позволяющая учесть шероховатость поверхности, представляет собой подложку конечных размеров, на которой заданы неоднородности. Форма неоднородностей описывается в виде поверхностей первого и второго порядков (плоскость, сфера, эллипсоид, параболоид, конус и др.). Степень шероховатости поверхности моделируется как видом, так и параметрами уравнений, описывающих неоднородности. На рис. 1 представлена визуализация одной из геометрий микроуровня.

Особенности алгоритма расчета модификации программы РОКС, разработанной для учета шероховатостей и названной РОКС-RG, состоят в следующем. Моделирование траектории светового кванта в макрогеометрии проводится традиционно до ее пересечения с одной из поверхностей макрообъекта. В указанной точке пересечения осуществляется переход к микрогеометрии, т.е. координаты частицы пересчитываются из основной геометрии в локальную. Далее траектория частицы прослеживается в рамках локальной геометрии до выхода за ее пределы.

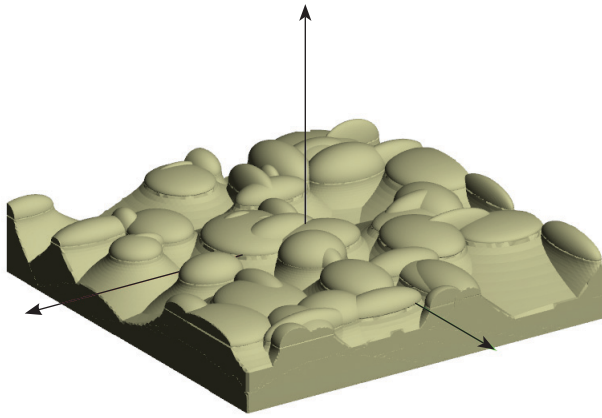


Рис. 1. Пример расчетной геометрии микроуровня.

При этом в актах взаимодействия частицы с неоднородностями микроуровня разыгрывается только зеркальное отражение. Вес отраженной частицы вычисляется по формулам Френеля. Соответствующие алгоритмы представлены, например, в работе [5]. При выходе частицы за пределы локальной геометрии совершается обратный переход к макрогеометрии. В ее рамках продолжается аналогичное моделирование траектории частицы до тех пор, пока частица не покинет исследуемый объект.

Выбор оптимального размера микрогеометрии

Были проведены исследования по оценке влияния краевых эффектов, направленные на выбор оптимального размера расчетной области и числа фигур, моделирующих неоднородность в модели микроуровня. Следует отметить, что поскольку методика ориентирована на приближение геометрической оптики, то при задании размеров расчетной схемы геометрии микроуровня можно воспользоваться законом подобия. А именно, результаты расчетов, полученные в трехмерной геометрии с линейными размерами $X \times Y \times Z$, можно распространять на геометрию с размерами $a(X \times Y \times Z)$, где a – коэффициент пропорциональности. Поэтому в дальнейшем при идентификации линейных размеров были использованы относительные единицы.

Исходя из геометрических рассмотрений для минимизации влияния краевых эффектов необходимо выполнение следующих условий. Во-первых, расстояния между неоднородностями должны быть существенно меньше линей-

ных размеров подложки. Во-вторых, проекция максимальной высоты неоднородностей h_{\max} на направление облучения должна быть существенно меньше, чем проекция линейного размера подложки L на указанное направление. Последнее условие означает необходимость выполнения неравенства $L \gg (htg\theta)$, где θ – угол падения излучения, отсчитываемый от нормали к поверхности подложки.

Для численного исследования влияния краевых эффектов материал пространства, окружающего сбоку подложку с неоднородностями, задавался либо абсолютным поглотителем, либо исследуемым материалом. Высота окружающего материала выбиралась равной максимальной высоте неоднородностей, смоделированных на подложке. Считалось, что влиянием краевых эффектов можно пренебречь в тех случаях, когда расчетные данные, полученные при указанных вариациях микрогеометрии, будут близки. Для исследований было смоделировано две микрогеометрии, в которых содержалось 36 и 100 эллипсоидов с поперечными размерами подложки 15×15 отн. ед. и 30×30 отн. ед. соответственно. Высота фигур, составляющих микрогеометрию, и их радиус варьировались таким образом, чтобы получить сильно шероховатую поверхность. Среднеквадратическое значение высоты неоднородностей σ было принято равным 1 отн. ед. Радиусы эллипсоидов выбирались равномерным розыгрышем в интервале 2,5–3,5 отн. ед. В процессе расчетов определялся коэффициент отражения от подложки в зависимости от угла падения излучения. На рис. 2 представлены зависимо-

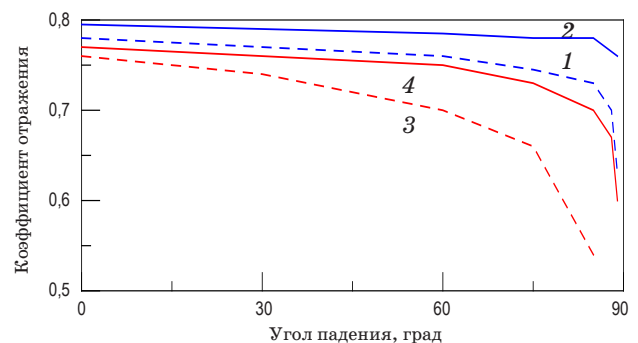


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения от угла падения излучения двух рассмотренных модификаций микрогеометрии (кривые 1, 2 – линейный размер 30 отн. ед., 3, 4 – линейный размер 15 отн. ед.).

сти коэффициента отражения от угла падения излучения двух рассмотренных модификаций микрогеометрии. Коэффициент отражения в акте единичного взаимодействия полагался равным 0,8. Сопоставление кривых, представленных на рисунке, показывает, что при указанных параметрах неоднородностей микрогеометрия с поперечным размером в 30 отн. ед. дает корректные результаты вплоть до угла падения, равного 85° . В этом случае различия в результатах, рассчитанных в рамках микрогеометрии с отражающими и поглощающими стенками, не превышают 1–6%. В то же время микрогеометрию с линейным размером в 15 отн. ед. можно корректно использовать для оценок отражения только в тех случаях, когда рассматривается отражение при углах падения, не превышающих 30° .

Тестирование методики

Тестирование методики проводилось на двух уровнях. На макроуровне были проведены сопоставления с результатами расчета отражения оптического излучения для модельных геометрий. Некоторые примеры сравнения модельных геометрий в виде сферы и цилиндра, отражающих диффузно и зеркально, как упомянуто выше, представлены в работе [4]. В дополнении к указанным сравнениям хорошие результаты показало сопоставление с данными модельных объектов в виде бесконечной асимметричной зеркально отражающей зубчатой поверхности и диффузно отражающего конуса [6].

Алгоритм моделирования, предложенный для оценки влияния шероховатости, проверялся по экспериментальным результатам измерения отражающих свойств материалов с известной степенью случайной шероховатости. Для сопоставления была выбрана работа [7], посвященная исследованиям влияния степени шероховатости на отражение света от металлических поверхностей. Авторы этой работы изготовили несколько образцов с различной степенью шероховатости, определили ее и провели подробные измерения углового распределения отраженного света, направляя на изготовленные образцы под различными углами параллельные пучки с длиной волны излучения $\lambda = 0,55$ мкм. Результаты измерений приведены в работе [7] в виде функций ДФО, нормированных на единицу телесного

угла. На рис. 3 представлены результаты сопоставления экспериментальных [7] и расчетных данных, полученных с использованием программы РОКС-RG, для функции двунаправленного отражения света поверхностью с параметром шероховатости, равным $(\sigma/\tau) = 0,084$, где σ – среднеквадратическое отклонение высоты неоднородностей, τ – их автокорреляционная длина. Данные представлены в виде зависимостей от угла отражения при нескольких углах падения в плоскости падения излучения. Расчетная информация по программе РОКС-RG была получена в рамках микрогеометрии, построенной с использованием эллипсоидов (вершины неоднородностей), сочлененных с эллиптическими гиперболоидами (основания неоднородностей). Для получения заданной степени неоднородности варьировались высота фигур и их радиус. Регистрация отраженного излучения осуществлялась с использованием угловой сетки Карлсона, которая позволяет разбить все пространство телесных углов на ячейки равной площади. Это достигается благодаря тому, что количество разбиений сетки по азимутальному углу зависит от полярного угла. Видно общее удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных в пределах 10%. В то же время расчетные значения при угле

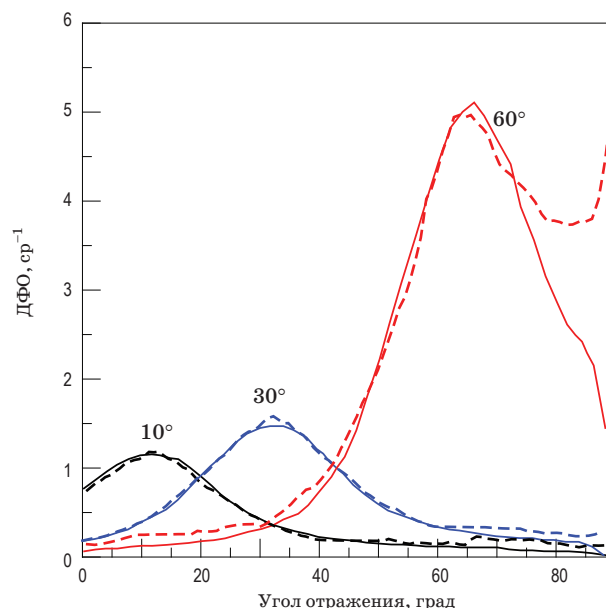


Рис. 3. ДФО поверхности с отношением σ/τ , равным 0,84, в зависимости от угла отражения излучения при различных углах падения. Сплошные линии – результаты получены экспериментально [7], штриховые – рассчитаны по программе РОКС-RG.

падения 60° и углах отражения, больших 75° , ведут себя иначе, чем экспериментальные данные. С ростом угла отражения расчетные значения ДФО увеличиваются. Причина различий требует дальнейших исследований, поскольку может быть связана как с погрешностями предложенной методики расчета, так и с неполной регистрацией в эксперименте излучения, отраженного под углами, большими указанного. Авторы [7] отмечают в качестве предела корректной регистрации углы, большие 85° .

Пример расчета трехмерного объекта

В качестве реального трехмерного объекта была рассмотрена полость изотермического радиатора, используемого в радиометрии в качестве стандарта черного тела. В частности, был выбран биконический радиатор, рассмотренный в работах [3, 8]. Параметры радиатора, взятые из работы [3], можно видеть на рис. 4. Внутренние стенки радиатора были покрыты зеркальной черной краской Z-302. В работе [8] приводятся результаты измерений коэффициентов отражения и черноты указанного радиатора в зависимости от положения локализованного источника излучения на входе в его полость. Эксперименты проводились при использовании инфракрасного (ИК) излучения с длиной волны, равной $10,6 \text{ мкм}$.

Следует отметить, что в работах [3, 8] не приводятся параметры неоднородностей материала Z-302, но в работе [3] представлены зависимости ДФО плоского слоя Z-302, полученные в эксперименте при нескольких значениях угла падения излучения с длиной волны,

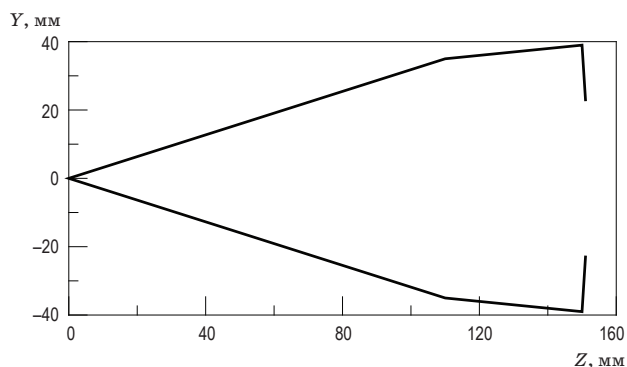


Рис. 4. Поперечное сечение радиатора.

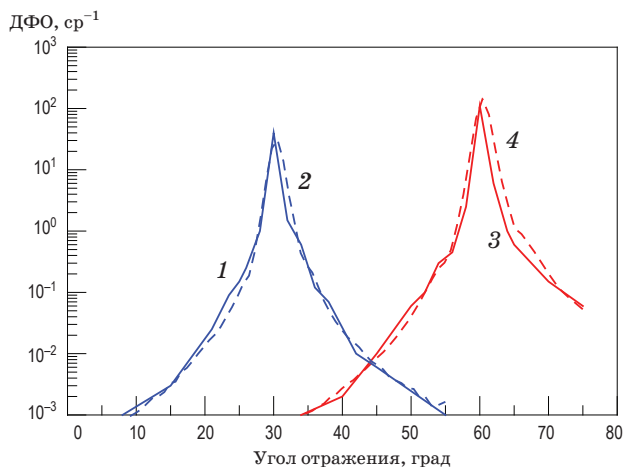


Рис. 5. ДФО материала Z-302 при различных углах падения излучения. Кривые 1, 3 — экспериментальные результаты [3], кривые 2, 4 — рассчитаны по программе РОКС-RG для углов 30 и 60° соответственно.

равной $10,6 \text{ мкм}$. Чтобы корректно составить модель шероховатой поверхности материала Z-302, были проведены расчеты ДФО плоского слоя и различных вариантов микрогеометрий, в которых менялись параметры фигур, ее составляющих. На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости ДФО, приведенные в работе [3], и расчетные данные по программе РОКС-RG, полученные при такой конфигурации микрогеометрии, которая дает результаты, наиболее близкие к экспериментальным.

Выбранная модель микрогеометрии была использована в дальнейших расчетах по определению отражающих свойств биконического радиатора локализованного источника. В эксперименте, описанном в работе [8], полость указанного радиатора облучалась ИК лазерным пучком диаметром 2 мм параллельно оси апертуры. Источник излучения располагался на различных расстояниях от центра апертуры. Излучение, выходящее из полости, регистрировалось с помощью интегрирующей сферы. На рис. 6 представлены экспериментальные данные значений коэффициента отражения потока излучения, выходящего из радиатора, в зависимости от положения источника и расчетные данные, полученные по программе РОКС-RG. Всплеск потока излучения в пределах кольца радиусом 6 мм в экспериментальных данных авторы работы [8] объясняют технологическими погрешностями при изготовлении конуса. Расчетная кривая, полученная для идеального

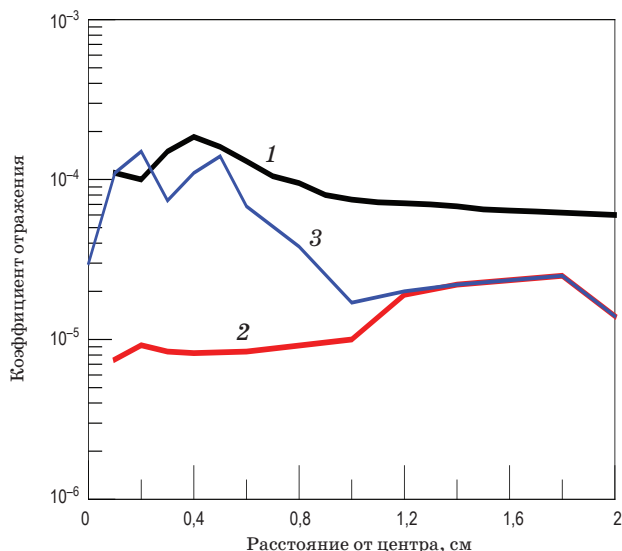


Рис. 6. Зависимости коэффициента отражения биконического радиатора от положения локализованного источника излучения. Кривые 1 — экспериментальные результаты [8], 2 (идеальный конус), 3 (неоднородный конус) — результаты расчета по программе РОКС-RG.

внутреннего конуса, лежит ниже экспериментальной и имеет достаточно гладкий вид. Отличия расчетной кривой от экспериментальной в средней части конуса составляют 3–4 раза. Проведенные расчетные исследования показали, что неоднородности внутри конуса могут значительно менять картину отражения. В качестве примера на рис. 6 также представлена зависимость коэффициента отражения для случая, когда во внутренней части вершины конуса имеется обратный конус высотой 1 см с углом полураствора, равным 45° . Видно, что здесь коэффициент отражения в центральной части конуса увеличивается почти на порядок. Таким образом, с учетом возможных

технологических отличий реального объекта (радиатора) от идеального можно сделать вывод о достаточно хорошем согласии расчетных данных с экспериментальными.

Погрешность расчета дифференциальных и интегральных величин, полученных с использованием программы РОКС-RG, составила менее 3%.

Выводы

Разработана методика расчета отражения оптического излучения в трехмерном объекте с учетом шероховатой структуры его поверхностей, реализованная в виде программы метода Монте-Карло РОКС-RG. Учет шероховатости осуществляется на основе представления объекта на макро- и микроуровнях. Микрогеометрия задается в виде подложки с неоднородностями, описываемыми уравнениями поверхностей второго порядка. Определено оптимальное количество фигур и геометрические размеры микрогеометрии, позволяющие корректно учесть влияние многократного отражения. Тестирование программы проведено по результатам экспериментальных исследований отражения света от материалов с известной степенью случайной шероховатости. Сопоставление с экспериментальными данными, полученными для трехмерного объекта в виде биконического радиатора, показало удовлетворительное согласие расчетных данных с данными эксперимента. Дальнейшее приложение разработанная методика может найти как в задачах оптической радиометрии, так и при проектировании оптических приборов, например, при разработке технических решений, связанных с защитой оптических приборов от сторонних световых потоков.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Torrance K.E., Sparrow E.M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces // JOSA. 1967. V. 57. № 9. P. 1105–1114.
2. He X.D., Torrance K.E., Sillion F.X., Greenberg D.P. A comprehensive physical model for light reflection // Comput. Graph. (Proc. SIGGRAPH 91). July 1991. V. 25. P. 175–186.
3. Hanssen L.M., Prokhorov A.V. A procedural model of reflection from random rough surfaces // Proc. SPIE. 2008. V. 7065. P. 1–12.
4. Класс Е.В., Ульянов С.А., Шаховский В.В. Моделирование блеска искусственных объектов на орбите Земли // Вестник СибГАУ. 2011. В. 6 (39). С. 142–148.

5. *Cook R.L., Torrance K.E.* A reflectance model for computer graphics // *Computer Graphics*. August 1981. V. 15. № 3. P. 307–316.
6. *Westin S.H.* Predicting reflectance functions from complex surfaces // Thesis Presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science. Association for Computing Machinery. 1992. 81 p.
7. *Li H., Torrance K.E.* An experimental study of the correlation between surface roughness and light scattering for rough metallic surfaces. Advanced characterization techniques for optics, semiconductors, and nanotechnologies II // Ed. by Duparr A., Singh B., Zu-Han Gu / *Proc. SPIE*. 2005. V. 5878. P. 1–15.
8. *Khromchenko V.B., Mekhontsev S.N., Hanssen L.M.* Design and evaluation of large-aperture gallium fixed-point blackbody // *Int. J. of Thermophysics*. 2009. V. 30. P. 9–19.