

А. В. Степанов, А. Л. Титов

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЙ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ  
В ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ**

*Изложены основы экспериментально-расчетного метода определения отражательных характеристик объектов в оптическом диапазоне. Дано описание разработанного экспериментального стенда для исследований отражательных характеристик материалов и покрытий с возможностью перестройки рабочей длины волны. Представлена методика и некоторые из результатов измерений.*

**E-mail: tital1952@mail.ru**

**Ключевые слова:** экспериментально-расчетный метод, отражательные характеристики объектов, оптический диапазон.

Совсем недавно для определения сигнальных характеристик объектов в лазерной локации применялись в основном измерения на уменьшенных моделях. Этот способ достаточно трудоемкий и дорогой. Также использовался расчетный способ определения сигнальных характеристик, в частности, эффективной площади рассеяния (ЭПР) объекта, при котором в качестве модели покрытия выбиралась модель идеального диффузного отражателя с коэффициентом отражения, близким коэффициенту отражения реального покрытия. Коэффициент отражения материалов и покрытий обычно измерялся на специальных приборах — спектрофотометрах. Для идеально-диффузной модели покрытия существуют законченные выражения для определения ЭПР объектов, представляющих собой совокупность тел вращения с поверхностями второго рода типа конус, цилиндр, сфера и плоскость, при заданном ракурсе наблюдения. Недостатки указанного расчетного способа — низкая точность оценки ЭПР объекта вследствие несоответствия характеристики покрытия и ее диффузной модели, а также невозможность оценки ЭПР объекта с более сложной поверхностью.

С развитием вычислительной техники окончательно сформировался экспериментально-расчетный метод определения характеристик объектов. В основе этого метода лежит фацетная модель поверхности объекта, т. е. модель, при которой поверхность объекта представляется в виде совокупности квазиплоских площадок. Подобная модель используется и в радиолокации<sup>\*</sup>. Отражательные свойства

<sup>\*</sup> Справочник по радиолокации: в 4 т. / под ред. М. Скольника; пер. с англ. под общей ред. К.Н. Трофимова. Т. 1. Основы радиолокации / под ред. Я.С. Ицхоки. — М.: Сов. Радио, 1976. — 456 с.

каждой такой площадке определяются внешним покрытием, а характеристики самого внешнего покрытия измеряются на специальном стенде. В качестве измеряемой характеристики материала или покрытия в расчетно-экспериментальном методе удобнее всего использовать удельную ЭПР  $\sigma_{\text{уд}}$  [1] — единицы площади образца покрытия или материала. Диаграмма удельной ЭПР  $\sigma_{\text{уд}}(\alpha)$  — зависимость удельной ЭПР от угла  $\alpha$  между нормалью к поверхности образца и направлением облучения и приема (для однопозиционной схемы стенда) или биссектрисой позиционного угла  $\beta_0$  (для двухпозиционной схемы).

Математические модели объектов формируются в 3D-среде. Эта среда позволяет по геометрическим параметрам объекта сформировать его трехмерную модель, состоящую из совокупности поверхностей типа конус, цилиндр, сфера, плоскость и тор, наложить на поверхность полученной модели сетку из треугольников с выбранным заранее их количеством, а затем экспортировать координаты вершин этой сетки в виде текстового файла в моделирующую программу. Параметрами математической модели объекта в 3D-среде являются: список вершин треугольников сетки на его поверхности и координаты этих вершин в системе координат, связанной с объектом. Таким образом, поверхность объекта представляется совокупностью квазиплоских треугольных площадок, образованных тремя векторами каждая (рис. 1).

ЭПР  $\sigma_j$  каждой такой площадки определяется выражением

$$\sigma_j = S_j \sigma_{\text{уд}}(\alpha_j),$$

где  $S_j$  — площадь элемента,  $S_j = \frac{1}{2} |AB \times AC|$ ;  $ON$  — направление нормали,  $ON = AB \times AC$ . Площадь элемента и направление нормали определяются векторным произведением двух из трех векторов, образующих элемент поверхности цели.

При энергетическом методе приема, в основном, применяемом в лазерной локации, ЭПР всего объекта  $\sigma_0$  рассчитывается как сумма ЭПР отдельных его элементов, при условии их освещенности ( $\cos \alpha_j \geq 0$ ). Если цель представлена в виде некоторой совокупности простых тел типа конус, цилиндр, часть сферы, плоскости, то суммирование проводится сначала по поверхности одного тела с учетом его внешнего покрытия, а затем по всей цели. Тогда

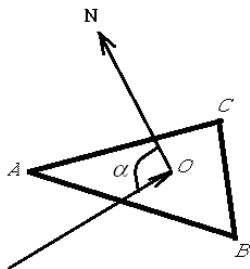


Рис. 1. К расчету ЭПР элемента поверхности объекта

$$\sigma_o = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} S_{ij} \sigma_{уди}(\alpha_j),$$

где  $N$  — количество простых тел, из которых состоит объект;  $N_i$  — количество освещаемых треугольников на поверхности  $i$ -го тела;  $\sigma_{уди}(\alpha_j)$  — удельная ЭПР внешнего покрытия  $i$ -го тела при угле наблюдения  $\alpha_j$ .

Как показали исследования, использование неких обобщенных моделей внешнего покрытия при минимальном количестве измерений не позволяет с приемлемой точностью оценить отражательные свойства реальных покрытий на различных длинах волн. Поэтому для измерения диаграмм удельной ЭПР материалов и покрытий был разработан и введен в эксплуатацию экспериментальный стенд, функциональная схема которого представлена на рис. 2.

Стенд состоит из четырех основных узлов: передающего лазерного комплекса I, фотоприемного устройства (ФПУ) II, поворотного устройства III и устройства управления и отображения информации IV.

В состав лазерного комплекса входят задающий лазерный генератор 1, система сменных блоков 2 и источник питания 3. Лазерный комплекс представляет собой систему из двух подсистем: подсистемы 1, состоящей из YAG:Nd-лазера и генераторов 2-й, 3-й и 4-й гармоник, а также подсистемы 2, включающей в себя перестраиваемый Ti:Sapphire-лазер, с генераторами 2-й, 3-й и 4-й гармоник. Генераторы вторых гармоник встроены внутрь корпусов самих лазеров, причем в YAG:Nd-лазере генератор второй гармоники постоянно подключен, а в Ti:Sapphire-лазере он подключается механически с помощью переключателя режимов. Сменные блоки окончательно формируют выходное излучение. Они могут содержать соответствующие генераторы гармоник (3-й или 4-й), аттенюаторы и сепараторы излучения. Таким образом, при работе подсистемы 1 генерируется, в зависимости от выбранного сменного блока, излучение на длинах волн 1 064, 532, 355 и 266 нм. Сепараторы сменных блоков обеспечивают спектральную чистоту излучения относительно побочного излучения не хуже 30 дБ. Выходное излучение является импульсным с длительностью импульса около 7...10 нс и частотой повторения 1...10 Гц. Максимальная энергия в импульсе при работе на 1-й гармонике — не менее 520 мДж, на 2-й — не менее 420 мДж, на 3-й — не менее 170 мДж, на 4-й — не менее 90 мДж. Аттенюаторы позволяют управлять импульсной энергией излучения в диапазоне 0...26 дБ.

При работе подсистемы 2 основным генератором излучения является Ti:Sapphire-лазер, перестраиваемый в диапазоне 700...960 нм. YAG:Nd-лазер, работающий в режиме генерации 2-й гармоники, является генератором излучения накачки Ti:Sapphire-лазера. Выходное

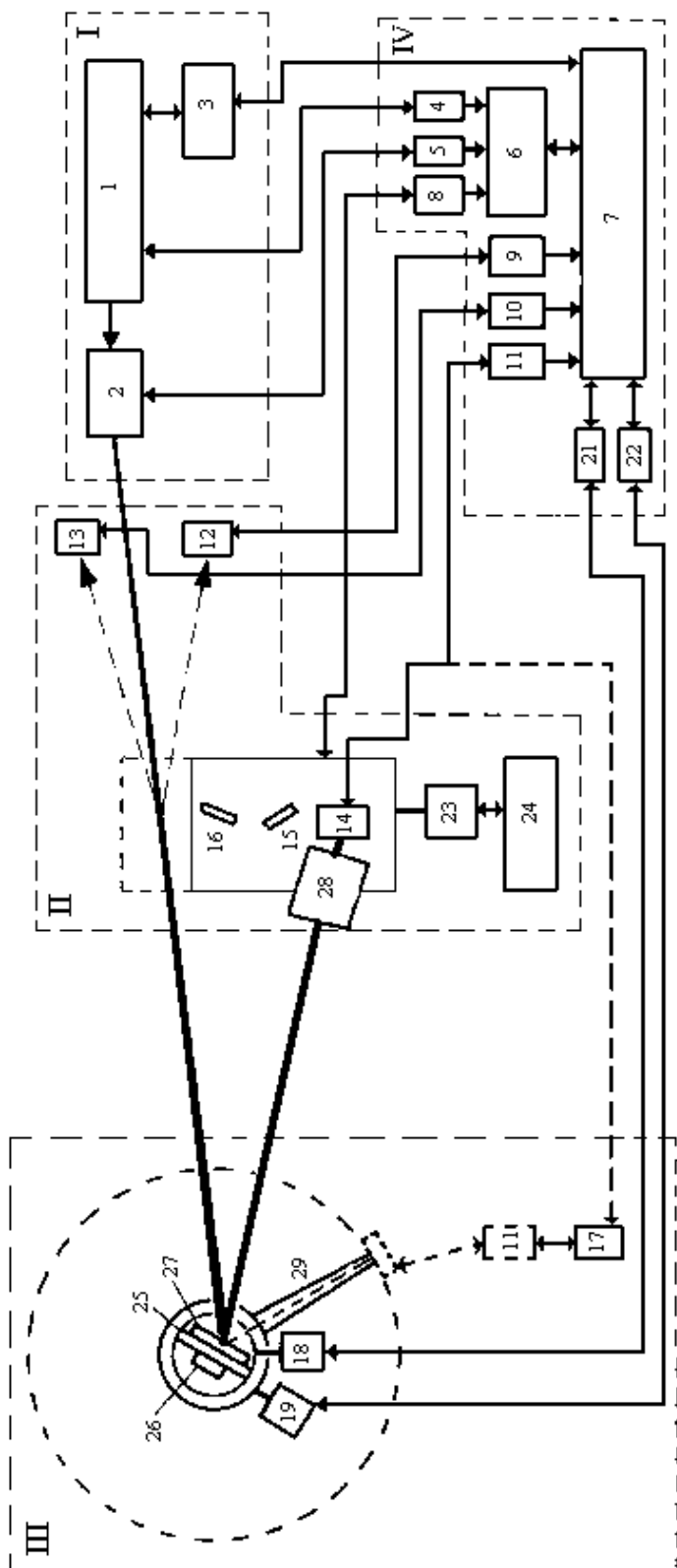


Рис. 2. Функциональная схема стенда

излучение с генератором 2-й гармоники перестраивается в диапазоне 350...480 нм, с генератором 3-й — в диапазоне 235...320 нм, 4-й — в диапазоне 210...240 нм. Выходная энергия зависит от длины волны излучения и определяется перестроечными кривыми. Длительность импульсов на выходе подсистемы 2 составляет 7...30 нс.

Управление режимом работы YAG:Nd-лазера и перестройкой Ti:Sapphire-лазера осуществляется как с отдельного пульта, так и с компьютера системы управления и отображения информации стенда IV.

Блоки 4 и 5 системы идентификации обеспечивают контроль текущей конфигурации лазерного комплекса и не допускает ошибочно го сочетания, блокируя генерацию излучения.

Фотоприемное устройство II состоит из трех (12, 13 и 14) измерительных фотоприемников (ФП) фирмы Ophir, двух плоско-выпуклых длиннофокусных линз 15 и 16, объектива Кассегрена 28 и перемещающейся платформы с приводом 23 и пультом управления 24. ФП 12 типа PD 25 и 13 типа PE 9, установленные на неподвижной платформе, служат для измерения импульсной энергии излучения непосредственно лазерного генератора. Линзы используются в качестве аттенюаторов излучения при измерениях энергии лазерного генератора. ФП 14 типа PD 10рj является основным измерительным приемником отраженного исследуемым образцом покрытия или материала. Перемещающаяся платформа с линзами и основным измерительным ФП 14 позволяет изменить режим работы ФПУ с измерения энергии лазера на измерение отраженного сигнала. При измерении отраженного образцом излучения ФП занимает положение в фокальной плоскости объектива 28. Положение платформы или, что то же самое, режим работы ФПУ, контролируется системой идентификации 8. Все ФП связаны с устройством отображения информации через USB-адаптеры 9, 10 и 11. В режиме измерения индикатрис рассеяния основной измерительный приемник 14 вместе с адаптером 11, но без объектива, перемещается на вращающуюся измерительную штангу 29.

Поворотное устройство III включает в себя две вращающиеся платформы: платформу для поворота образца (образцовой меры) 25 и платформу со штангой 29 для вращения измерительного ФП в режиме измерения индикатрис. Шаговые двигатели 18 и 19 обеспечивают нужное положение платформ, контролируемое устройством управления IV через конвертеры CAN-USB (21 и 22).

В состав системы управления и отображения информации IV, кроме упомянутых конвертеров CAN-USB и USB-адаптеров связи с ФП входят компьютер 7 и плата ввода-вывода 6 типа PCI7248, обеспечивающая работу системы идентификации (блоки 4, 5 и 8).

Стенд управляется программой, написанной в среде LabView. Управляющий интерфейс программы — многооконный интерфейс

с возможностями внесения изменений в каждом активном окне. Программа позволяет включать и выключать источник питания лазерного генератора, изменять его параметры: частоту следования импульсов от 0,01 до 10 Гц, количество импульсов в пачке, уровень накачки генератора и усилителя и др. Кроме того, программа обеспечивает контроль конфигурации лазерного генератора, дает оператору необходимые подсказки по установке разрешенной конфигурации, блокирует излучение в случае неправильных действий. Контролируется также активный ФП, его текущая шкала на заданной длине волны, положение платформы с измеряемым образцом и образцовой мерой и многое другое. В процессе измерений строится диаграмма удельной ЭПР и отображается уровень энергии отраженных образцом импульсов. В каждой точке вычисляется среднее значение удельной ЭПР и границы ее изменения по  $3\sigma$  в каждую сторону.

В рассматриваемом стенде применяется относительный метод измерения, при котором энергия, отраженная образцом покрытия, сравнивается с энергией, полученной от эталонного диффузного отражателя с известной характеристикой отражения (правильное название такого отражателя — образцовая мера спектрального коэффициента диффузного отражения). При таком методе удельная ЭПР образца покрытия определяется по формуле

$$\sigma_{\text{уд}}(\alpha) = \frac{\sigma_3}{E_3 S} E(\alpha),$$

где  $\sigma_3$  — ЭПР образцовой меры,  $S$  — площадь облучаемой поверхности плоского образца;  $E_3$  и  $E(\alpha)$  — показания регистрирующего прибора при измерении энергии отраженных сигналов соответственно от образцовой меры и исследуемого образца.

ЭПР образцовой меры можно найти, исходя из общей формулы для определения ЭПР объекта:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{\Pi_2}{\Pi_1},$$

где  $R$  — расстояние до объекта;  $\Pi_1$  — плотность падающего потока мощности (энергии) в точке расположения объекта,  $\Pi_2$  — плотность потока мощности в точке приема (энергии).

Плотность потока мощности  $\Pi_1$  при равномерном облучении потоком мощности  $\Phi_1$  плоской поверхности эталона площадью  $S_3$  рассчитывается по формуле

$$\Pi_1 = \frac{\Phi_1}{S_3}.$$

Полный отраженный поток мощностью  $\Phi$  можно выразить с одной стороны через падающий поток  $\Phi_1$  и коэффициент отражения эталона  $\rho_0$ :

$$\Phi = \Phi_1 \rho_0 = \Pi_1 \rho_0 S_3,$$

а с другой стороны — через индикатрису силы излучения эталона  $I(\beta) = I_0 i(\beta)$  как

$$\Phi = I_0 \left[ 2\pi \int_0^{\pi/2} i(\beta) \sin \beta d\beta \right],$$

где  $2\pi \int_0^{\pi/2} i(\beta) \sin \beta d\beta = \Omega_3$  — эквивалентный телесный угол рассеяния эталона, т. е.  $\Phi = I_0 \Omega_3$ .

Эквивалентным телесным углом называют такой телесный угол, в котором распространялся бы весь отраженный поток, если бы сила излучения была равна  $I_0$  по всем направлениям внутри этого угла. Для идеального диффузного рассеивателя (ламбертовского) эквивалентный телесный угол

$$\Omega_3 = 2\pi \int_0^{\pi/2} \cos \beta \sin \beta d\beta = \pi.$$

Поток мощности  $\Phi_2$ , перехватываемый приемной системой в телесном угле  $\Omega$ , рассчитывается по формуле

$$\Phi_2 = \int_{\Omega} I(\beta) d\Omega.$$

Для малых значений  $\Omega$ , в пределах которого силу излучения можно считать постоянной, т. е.  $I(\beta) = I_0 = \text{const}$ , получаем

$$\Phi_2 = I_0 \Omega \approx I_0 \frac{S_a}{R^2},$$

где  $S_a$  — площадь апертуры приемной системы.

Тогда плотность потока мощности в точке приема

$$\Pi_2 = \frac{\Phi_2}{S_a} = \frac{I_0}{R^2}.$$

Подставляя  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  в формулу для ЭПР эталона, получим

$$\sigma_3 = 4S_3 \rho_0 \frac{1}{L}.$$

Здесь  $L$  — коэффициент диффузности эталона, равный отношению эквивалентного угла рассеяния эталона  $\Omega_3$  к эквивалентному углу  $\pi$  рассеяния идеального диффузного отражателя, т. е.  $L = \frac{\Omega_3}{\pi}$ . Данные

на образцовую меру, приведенные в ее паспорте, обычно содержат сведения о коэффициенте отражения и коэффициенте диффузности на нескольких рабочих длинах волн. Так как при измерениях лазерный луч полностью перехватывается образцом покрытия и эталонным отражателем, то облучаемые площади  $S(\alpha)$  и  $S_3$  можно выразить через площадь поперечного сечения лазерного луча  $S_{л}$ :

$$S(\alpha) = S_{л} / \cos(\alpha); \quad S_3 = S_{л} / \cos(\alpha_{нач}),$$

где  $\alpha_{нач}$  — начальный угол установки эталонного отражателя, исключаяющий зеркальный блик (3...5 град). Таким образом, окончательная формула для расчета удельной ЭПР образца покрытия имеет вид

$$\sigma_{уд}(\alpha) = 4 K \frac{\rho_0}{L} \cdot \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\alpha_{нач})} \cdot \frac{E(\alpha)}{E_3},$$

где  $K$  — коэффициент, учитывающий изменение энергии лазерного генератора, а также пропускание оптических элементов стенда при измерениях энергии излучения от эталонного отражателя и образца покрытия.

В качестве эталонного отражателя или образцовой меры спектрального коэффициента диффузного отражения в стенде используется плоская пластина из спеченных нитей фторопласта ФТ-4, изготовленная в ВНИИОФИ Госстандарта РФ. Основные параметры образцовой меры приведены ниже:

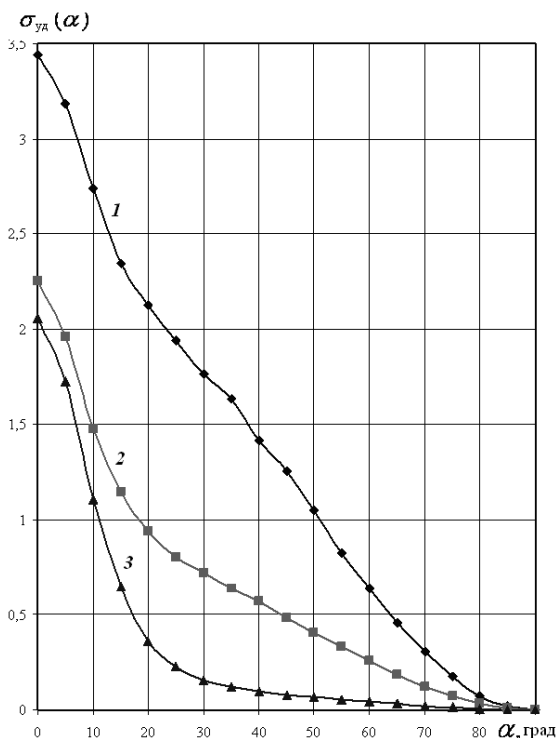
Длина волны .....	1	2	3	4	5
Коэффициент отражения.....	0,985	0,965	0,943	0,918	0,891



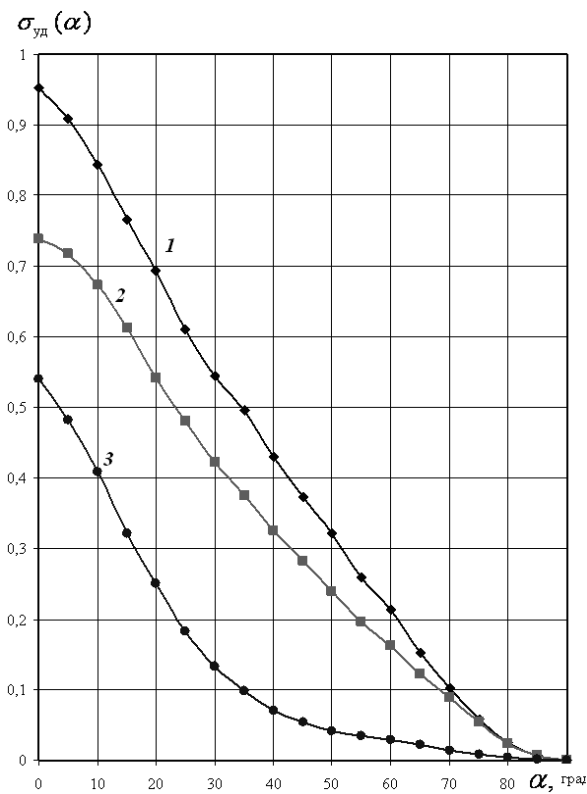
Коэффициент  
диффузности ..... 0,6      0,672      0,696      0,708      0,715

На образцовую меру имеется сертификат калибровки, выданный ВНИИОФИ.

В настоящее время с помощью описанного выше стенда создан банк данных по отражательным характеристикам некоторых материалов и покрытий. В качестве примера на рис. 3 и 4 представлены диаграммы удельной ЭПР эмали светло- и темно-зеленого оттенков, соответственно, на трех длинах волн: 1 064, 532 и 355 нм. Сравнение соответствующих диаграмм между собой показывает, что светло-зеленая эмаль на всех рассматриваемых длинах волн отражает значительно лучше, чем темно-зеленая. Так как у эмалей одинакового цвета различными могут быть не только оттенки, но и состав, характер поверхности (матовый, зеркальный, полуматовый и т. д.), спектральные характеристики пропускания связующего лака и др., очевидно, что использование каких-либо обобщенных моделей покрытий в данном случае является бесперспективным. Измерение на стенде требует сравнительно небольшого времени и средств и позволяет выявить некоторые особенности в отражательных характеристиках материалов и покрытий, изменения их по спектру и другим параметрам, что в конечном счете обеспечивает более точную оценку отражательных характеристик объектов, использующих эти покрытия.



**Рис. 3.** Диаграммы удельной ЭПР светло-зеленой эмали на разных длинах волн:  
1 — 1 064 нм; 2 — 532 нм; 3 — 355 нм



**Рис. 4.** Диаграммы удельной ЭПР темно-зеленой эмали на разных длинах волн:

1 — 1064 нм; 2 — 532 нм; 3 — 355 нм

Таким образом, в настоящей работе:

- даны основы экспериментально-расчетного метода определения отражательных характеристик объектов в лазерной локации, базирующегося на фасетной модели представления их поверхности и полученных экспериментально характеристик отражения внешних покрытий;
- описан разработанный уникальный многоспектральный лазерный стенд, предназначенный для исследования отражательных характеристик материалов и покрытий;
- представлена методика измерений на стенде, основанная на замещении исследуемого материала сертифицированной образцовой мерой спектрального коэффициента диффузного отражения;
- показаны преимущества измерения характеристик на стенде по сравнению с использованием обобщенных моделей отражения покрытий.

Статья поступила в редакцию 07.09.2012