

УДК 535.36:535.51

И.В. Вощула, В.А. Длугунович, А.Ю. Жумарь

ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИМИ ПОКРЫТИЯМИ И КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

I.V. Voschula, V.A. Dlugunovich, A.Yu. Zhumar

Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
68 Nezalezhnastsi Ave., Minsk, 220072, Belarus.

BACKSCATTERING OF POLARIZED LASER RADIATION BY THERMAL CONTROL COATINGS AND CONSTRUCTIONAL MATERIALS

Изучены закономерности отражения назад материалами и покрытиями, используемыми в изделиях аэрокосмической техники, которые освещались линейно поляризованным излучением гелий-неонового лазера с длиной волны 632,8 нм. Использована бистатическая схема измерений, т. е. источник излучения и фотоприемник располагались неподвижно. Изменение угла падения излучения на образец осуществлялось поворотом образца. Наблюдается хорошее соответствие между результатами измерений и расчетов.

СТЕПЕНЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ, ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДВУНАПРАВЛЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ, ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ.

The backscattering of spacecraft materials and coatings illuminated by linearly polarized radiation of He-Ne laser at a wavelength of 632.8 nm has been studied. Bistatic measurement scheme was used, i. e. the laser and a detector were placed stationary. Variation of the incidence angle was carried out by sample rotation. There was a good agreement between the results of measurements and calculations.

DEGREE OF POLARIZATION, LASER RADIATION, BIDIRECTIONAL REFLECTANCE DISTRIBUTION FUNCTION, THERMAL CONTROL COATING.

При разработке и создании поляризационно-чувствительных систем дистанционного зондирования и распознавания аэрокосмических объектов [1 – 3], а также неразрушающего контроля элементов изделий аэрокосмической техники [4, 5] требуются сведения о закономерностях обратного отражения терморегулирующими покрытиями и конструкционными материалами, используемыми в летательных аппаратах, при освещении их поляризованным излучением. Аналитическое описание углового распределения коэффициента двунаправленного отражения данных материалов является очень сложным, так как требует знания оптических констант материала, параметров шероховатости его поверхно-

сти, вида функции затенения микрограней шероховатости и корректного учета одно- и многократного рассеяния излучения на поверхности и в объеме образца [6, 7]. По этой причине для установления закономерностей взаимодействия поляризованного излучения с конструкционными материалами и покрытиями космических аппаратов требуется проведение экспериментальных исследований [3, 6 – 11].

Ранее нами были исследованы угловые зависимости коэффициента зеркального отражения поверхности терморегулирующих покрытий и теплозащитных материалов, освещаемых линейно поляризованным излучением гелий-неонового лазера, что позволило установить их оптические кон-

станты [10]. Исследования рассеяния поляризованного лазерного излучения в диапазоне углов регистрации θ_r от 5 до 80° при неизменном угле падения $\theta_i = -5^\circ$ были проведены в статье [11].

В данной работе изучены закономерности отражения назад материалами и покрытиями, используемыми в изделиях аэрокосмической техники, которые освещались линейно-поляризованным излучением гелий-неонового лазера с рабочей длиной волны 632,8 нм. Использовалась бистатическая схема измерений, т. е. источник излучения и фотоприемник располагались неподвижно. Угол $\alpha = (|\theta_i| + \theta_r)$ между направлением лазерного луча и направлением наблюдения был постоянным и составлял 10°. Такая схема измерений может применяться в активных системах дистанционного зондирования и распознавания аэрокосмических объектов. Изменение угла падения излучения на образец θ_i и угла регистрации θ_r осуществлялось поворотом образца на угол γ вокруг оси, перпендикулярной плоскости падения, которая располагалась горизонтально.

Исследовались образцы терморегулирующих покрытий: серебристой (ВЭ-30), черных (АК-512 и АК-243), белых (КО-5191 и АК-573) эмалей и белого керамического покрытия ТП-15М, нанесенных на алюминиевый сплав АМг6, а также углепластика КМУ-4, зеленой краски АК-512з на поверхности фенольного пластика, химически полированного алюминия и титанового сплава ОТ4. Данные материалы широко применяются в конструкциях космических аппаратов [12 – 15].

Методика измерения поляризационных характеристик излучения, отраженного образцами

Измерения проводились на лазерном гониофотометрическом Стокс-поляриметре, который был собран по одноканальной схеме с вращающейся фазовой пластинкой $\lambda/4$ и неподвижным анализатором (рис. 1) [16]. Источником излучения служил гелий-неоновый лазер ЛГ-126. Диаметр многомодового лазерного пучка составлял примерно 4 мм. Зондирующее лазерное излучение

было поляризовано в плоскости падения либо в ортогональной ей плоскости. Изучаемый образец располагался на столике гониометрического устройства. Телесный угол регистрирующей системы $\Delta\omega$ составлял $7,2 \cdot 10^{-3}$ ср, а угловое разрешение $\Delta\theta_r$ в плоскости наблюдения – около 5°. Изменялись интенсивность I_0 лазерного излучения, падающего на образец, а также интенсивность I_r и нормированные параметры Стокса $\{1, p_1, p_2, p_3\}$ излучения, отраженного исследуемыми материалами в диапазоне углов поворота образцов γ от 5 до 70° (см. рис. 1). Это позволяло определять степень поляризации отраженного излучения P в зависимости от угла поворота образцов γ :

$$P(\gamma) = \sqrt{p_1^2(\gamma) + p_2^2(\gamma) + p_3^2(\gamma)}. \quad (1)$$

В качестве радиометрической величины, характеризующей распределение потока, отраженного по различным направлениям поверхностью при ее направленном освещении, использовали функцию распределения двунаправленного коэффициента отражения [11, 17]:

$$f(\gamma) = \frac{I_r(\gamma)}{I_0 \Delta\gamma \cos \gamma_r} \text{ (ср}^{-1}\text{)}. \quad (2)$$

В отличие от двунаправленного коэффициента отражения, значения которого для

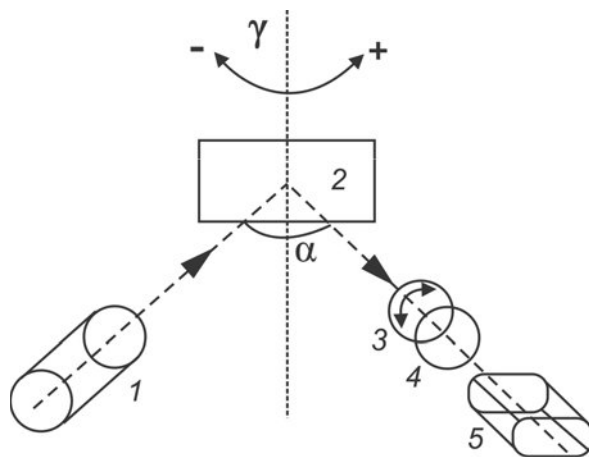


Рис. 1. Схема измерений поляризационных характеристик излучения, отраженного исследуемыми материалами назад при бистатическом угле $\alpha = 10^\circ$: 1 – лазер, 2 – образец, 3 – вращающаяся фазовая пластинка ($\lambda/4$), 4 – поляризатор, 5 – фотоприемник; γ – угол поворота образца

образцов с шероховатой поверхностью зависят не только от материала, но и от телесного угла измерительной системы $\Delta\omega$ (для одного и того же материала чем больше этот телесный угол, тем выше двунаправленный коэффициент отражения), значения функции $f(\gamma)$ не зависят от $\Delta\omega$. Использование указанной функции позволяет сравнивать отражательные свойства материалов, измеренные различными авторами, независимо от телесного угла $\Delta\omega$ применяемой ими регистрирующей системы.

Связь угла падения θ_i и угла регистрации θ_r с углом поворота образца γ задается следующими выражениями (см. рис. 1):

$$\theta_i = -\left(\gamma + \frac{\alpha}{2}\right); \quad (3)$$

$$\theta_r = -\left(\gamma - \frac{\alpha}{2}\right). \quad (4)$$

Модуль абсолютной погрешности измерения степени поляризации отраженного излучения $P(\gamma)$ не превышал 0,03 [16], а относительной погрешности определения $f(\gamma) - 0,07$ [11].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

При углах падения $\theta_i = -5^\circ$ и наблюдения $\theta_r = 5^\circ$ (в данных измерениях это

соответствует углу поворота образцов $\gamma = 0^\circ$) излучение, отраженное химически полированным алюминием, сплавом ОТ4, серебристым покрытием ВЭ-30, черными эмалями и углепластиком КМУ-4, практически не деполаризуется. Так, степень поляризации излучения с длиной волны 632,8 нм, отраженного указанными материалами при $\gamma = 0^\circ$, составляет $0,99 \pm 0,01$ (рис. 2). С увеличением угла поворота образцов степень поляризации излучения, отраженного назад металлами, серебристым покрытием, черными эмалями и углепластиком, уменьшается. При этом излучение, отраженное металлами, деполаризуется слабо:

$$P(\gamma) = 0,96 \pm 0,01 \text{ при } \gamma = 40^\circ,$$

а излучение, отраженное серебристым покрытием, черными эмалями, углепластиком, деполаризуется сильнее. Например, степень поляризации излучения, отраженного при $\gamma = 60^\circ$ серебристой эмалью ВЭ-30 и черными покрытиями, составляет $0,85 \pm 0,01$, а отраженного углепластиком — $0,74 \pm 0,02$ (см. рис. 2).

Излучение, отраженное зеленой краской АК-512з при $\gamma = 0^\circ$, более деполаризовано, чем излучение, отраженное серебристым покрытием, черными эмалями и углепластиком. Степень поляризации излучения,

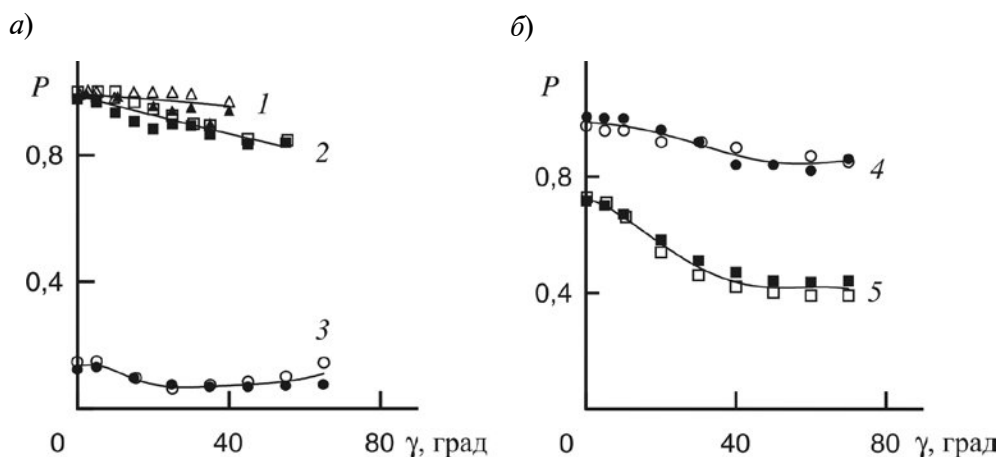


Рис. 2. Зависимости степени поляризации излучения ($\lambda = 632,8$ нм), отраженного назад различными материалами, от угла поворота образцов:

1 — химически полированный алюминий; 2 — черная эмаль АК-512; 3 — белая эмаль КО-5191; 4 — углепластик КМУ-4; 5 — зеленая краска АК-512з; светлые и темные знаки — падающее излучение линейно поляризовано в плоскости падения и ей ортогональной, соответственно; линии — усредненные значения $P = (P_{\parallel} + P_{\perp})/2$

отраженного зеленой краской АК-512з при $\gamma = 0^\circ$, составляет $0,72 \pm 0,01$ и с увеличением угла поворота образцов до 60° уменьшается до $0,42 \pm 0,03$ (рис. 2, б).

Излучение, отраженное белыми покрытиями, практически полностью деполаризовано:

$$P(\gamma) = 0,09 \pm 0,03 \text{ при } \gamma = 0^\circ,$$

и степень его поляризации почти не изменяется с увеличением угла поворота образца γ (см. рис. 2, а).

В отличие от степени поляризации излучения, отраженного в зеркальном направлении [10], либо рассеянного в диапазоне θ , от 5 до 80° при освещении образцов под неизменным углом падения $\theta_i = -5^\circ$ [11], степень поляризации излучения, отраженного исследуемыми материалами назад, не зависит от азимута поляризации зондирующего линейно-поляризованного излучения (см. рис. 2).

Установленные закономерности можно объяснить, если использовать существующие представления, согласно которым излучение, отраженное материалом, сформировано в результате рассеяния падающего излучения как на шероховатостях поверхности, так и на подповерхностных неоднородностях в объеме материала [6, 7]. Деполаризация излучения, рассеянного первым из указанных путей, обычно мала [18, 19]. Вызвано это тем, что отражение происходит, в основном, за счет однократного рассеяния на микроплощадках шероховатой поверхности с сохранением состояния поляризации падающего луча. Излучение же, отраженное в результате многократного рассеяния на шероховатостях поверхности, деполаризуется сильнее [18, 19]. Что касается излучения, отраженного частично прозрачными материалами, то оно сформировано, в основном, в объеме материала при многократном рассеянии на подповерхностных неоднородностях и поэтому сильно деполаризовано [20].

Высокая степень поляризация излучения, отраженного химически полированным алюминием, сплавом ОТ4, углепластиком, черными и серебристым покрытиями, свидетельствует об однократном рассеянии

падающего излучения микроплощадками шероховатой поверхности данных материалов. Более существенная деполаризация излучения, отраженного зеленой краской, вызвана многократным рассеянием на шероховатостях ее поверхности [10, 11]. Существенная деполаризация излучения, отраженного белыми покрытиями, указывает на то, что значительную долю в отраженном ими потоке составляет вышедшее из объема материала, многократно рассеянное, деполаризованное излучение.

Имеется совпадение между результатами данных измерений и теоретического моделирования [21], которое показало, что степень поляризации излучения, рассеянного назад, зависит не только от шероховатости поверхности материала, но и от его типа. Например, степень поляризации излучения, отраженного назад диэлектриками, имеющими небольшой коэффициент преломления, заметно уменьшается с увеличением угла падения, в то время как степень поляризации излучения, отраженного назад металлами, изменяется несущественно даже при очень больших углах падения [21].

Используя результаты измерения степени поляризации отраженного излучения и функции распределения двунаправленного коэффициента отражения образцов $f(\gamma)$ (см. формулу (2)), можно определить компоненты $f(\gamma)$, соответствующие отражению поляризованной $f_{pol}(\gamma)$ и деполаризованной $f_{dep}(\gamma)$ составляющих отраженного излучения. С этой целью были измерены функции распределения двунаправленного коэффициента отражения $f_{\parallel}(\gamma)$ и $f_{\perp}(\gamma)$ образцов, освещаемых излучением, поляризованным в плоскости падения либо в ортогональной ей плоскости, в зависимости от угла регистрации γ . Функции $f_{\parallel}(\gamma)$ и $f_{\perp}(\gamma)$ исследуемых материалов определялись с помощью выражения (2), с учетом связи между углом поворота образца γ , бистатическим углом α и углом регистрации θ_r отраженного излучения (4).

Поскольку поток, отраженный материалом, состоит из поляризованной и деполаризованной компонент, полученные зави-

симости $f_{\parallel}(\gamma)$ и $f_{\perp}(\gamma)$ были представлены в виде суммы двух слагаемых, которые описывают отражение поляризованного $f_p(\gamma)$, $f_s(\gamma)$ и деполаризованного $f_{dep}^{\parallel}(\gamma)$, $f_{dep}^{\perp}(\gamma)$ излучений соответственно [6, 7]:

$$f_{\parallel}(\gamma) = f_p(\gamma) + f_{dep}^{\parallel}(\gamma); \quad (5)$$

$$f_{\perp}(\gamma) = f_s(\gamma) + f_{dep}^{\perp}(\gamma). \quad (6)$$

Чтобы установить, как изменяются $f_p(\gamma)$ и $f_s(\gamma)$ исследованных образцов от угла их поворота γ , необходимо перемножить измеренные значения $P_{\parallel}(\gamma)$ и $f_{\parallel}(\gamma)$, а также $P_{\perp}(\gamma)$ и $f_{\perp}(\gamma)$, соответствующие одинаковым углам γ [6, 7]:

$$f_p(\gamma) = P_{\parallel}(\gamma)f_{\parallel}(\gamma); \quad (7)$$

$$f_s(\gamma) = P_{\perp}(\gamma)f_{\perp}(\gamma), \quad (8)$$

где $P_{\parallel}(\gamma)$, $P_{\perp}(\gamma)$ – степени поляризации излучения, отраженного исследуемыми материалами при освещении их излучением, поляризованным либо в плоскости падения, либо в ортогональной ей плоскости.

Аналогичным образом можно определить изменение составляющих $f_{dep}^{\parallel}(\gamma)$ и $f_{dep}^{\perp}(\gamma)$, которые описывают отражение деполаризованного излучения [6, 7]:

$$f_{dep}^{\parallel}(\theta_r) = [1 - P_{\parallel}(\theta_r)]f_{\parallel}(\theta_r); \quad (9)$$

$$f_{dep}^{\perp}(\theta_r) = [1 - P_{\perp}(\theta_r)]f_{\perp}(\theta_r). \quad (10)$$

Поскольку неполяризованное излучение можно разложить на две компоненты исходного пучка, равные по интенсивности, некогерентные и ортогонально линейно-поляризованные, то, определив в соответствии с формулами (7) – (10) зависимости $f_p(\gamma)$, $f_s(\gamma)$ и $f_{dep}^{\parallel}(\gamma)$, $f_{dep}^{\perp}(\gamma)$, можно найти функцию распределения двунаправленного коэффициента отражения $f(\gamma)$ исследованных образцов, освещаемых неполяризованным излучением:

$$f(\gamma) = f_{pol}(\gamma) + f_{dep}(\gamma), \quad (11)$$

где

$$f_{pol}(\gamma) = [f_p(\gamma) + f_s(\gamma)] / 2; \quad (12)$$

$$f_{dep}(\gamma) = [f_{dep}^{\parallel}(\gamma) + f_{dep}^{\perp}(\gamma)] / 2. \quad (13)$$

Установлено, что химически полированный алюминий и сплав ОТ4 отражают назад зеркально. Существенная зеркальная составляющая присутствует также в компоненте $f_{pol}(\gamma)$ функции распределения двунаправленного коэффициента отражения серебристого покрытия ВЭ-30, черной эмали АК-512, белой эмали КО-5191 и углепластика КМУ-4. Результаты определения зависимости $f_{pol}(\gamma)$ серебристого покрытия ВЭ-30 и зеленой краски АК-512з представлены на рис. 3 точками.

Аналогичный характер рассеяния дан-

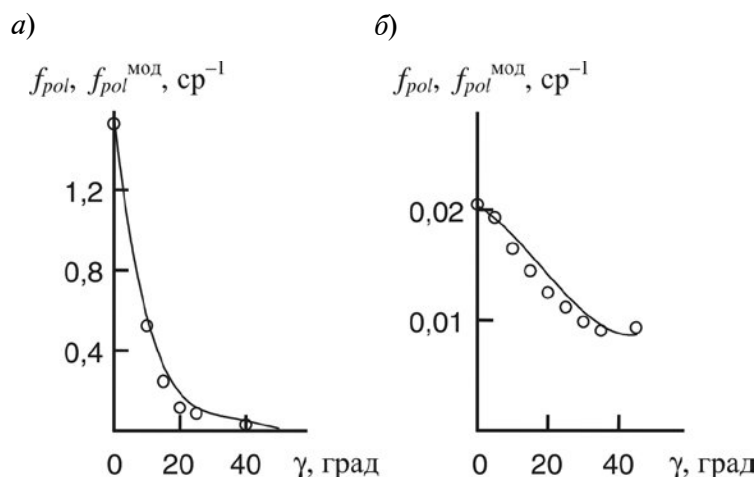


Рис. 3. Экспериментальные (символы) и расчетные (линии) зависимости компоненты функции распределения $f(\gamma)$ от угла поворота образцов для двух материалов: а – серебристая эмаль ВЭ-30; б – зеленая краска АК-512з; расчет $f_{pol}^{mod}(\gamma)$ по формуле (13) с использованием параметров, установленных в работах [10, 11]

ными материалами наблюдался и при их освещении под неизменным углом падения $\theta_i = -5^\circ$ [11]. Однако при рассеянии назад компонента $f_{pol}(\gamma)$ функции распределения двунаправленного коэффициента отражения исследуемых образцов — более узкая, чем соответствующая компонента $f_{pol}(\gamma)$ при освещении их под неизменным углом падения $\theta_i = -5^\circ$. Это объясняется тем, что поток, отраженный назад, формируется в основном за счет однократного зеркального отражения на микрогранях шероховатой поверхности и вклад многократного отражения при этом минимален.

При описании полученных зависимостей перспективно использовать полуэмпирическую модель [6], в которой поверхность материала представляется в виде совокупности статистически распределенных по ориентациям микроплощадок, каждая из которых отражает электромагнитное излучение в соответствии с законами геометрической оптики. Данная двухкомпонентная модель широко используется при анализе результатов пассивного дистанционного зондирования и распознавания объектов для описания рассеяния поляризованной и деполаризованной компонент излучения, отраженного рассеивающими материалами с шероховатыми поверхностями, которые освещаются неполяризованным солнечным излучением [6, 7]. Поляризационные характеристики отраженного излучения в данной модели учитываются френелевскими коэффициентами отражения микроплощадки для излучения, поляризованного в плоскости падения либо в ортогональной ей плоскости. Поэтому эту модель можно использовать и для описания рассеяния излучения объектами, которые освещаются линейно-поляризованным излучением.

В используемой модели выражение для компоненты $f_{pol}^{mod}(\gamma)$ исследуемых материалов, описывающей отражение поляризованного излучения, записывается в виде [6, 7]:

$$f_{pol}^{mod}(\gamma) = \frac{R_F(\beta)}{4 \cos \theta_i \cos \theta_r} p(\theta_N) SO(\tau, \Omega), \quad (14)$$

где $R_F(\beta)$ — френелевские коэффи-

циенты отражения микроплощадки; β — угол между нормалью к микроплощадке и падающим (зеркально отраженным) лучом; θ_i, θ_r — углы падения и регистрации, связанные с углом поворота образца γ выражениями (3) и (4); $p(\theta_N)$ — функция вероятности распределения нормалей к микроплощадкам, имеющая размерность sr^{-1} ; θ_N — угол между нормальями к поверхности и к микроплощадке; $SO(\tau, \Omega)$ — функция, учитывающая затенение микроплощадками падающего излучения или экранирование ими рассеянного излучения.

Влияние функции $p(\theta_N)$ заключается в описании распределения интенсивности излучения, отраженного в зеркальном направлении. В данной модели в качестве функции вероятности распределения нормалей к микроплощадкам $p(\theta_N)$ используются функция Гаусса либо модифицированная функция Коши. В работе [11] было показано, что лучшее совпадение результатов измерений и расчета наблюдается при аппроксимации функции $p(\theta_N)$ шероховатости поверхности исследованных образцов модифицированной кривой Коши:

$$p_c(\theta_N) = p_c(\theta_N) = \frac{B}{\cos \theta_N (\sigma^2 + \tan^2 \theta_N)}, \quad (15)$$

где σ — безразмерный параметр, характеризующий шероховатость поверхности; B — параметр, характеризующий наклон микроплощадок шероховатой поверхности и имеющий размерность sr^{-1} [6, 7].

Функция $SO(\tau, \Omega)$ имеет вид [6, 7]:

$$SO(\tau, \Omega) = \frac{1 + \frac{\theta_N}{\Omega} \exp(-2\beta / \tau)}{1 + \frac{\theta_N}{\Omega}}, \quad (16)$$

где τ, Ω — параметры, имеющие размерность углов.

Связь между углами β, θ_N и θ_i, θ_r задается следующими уравнениями [6, 7]:

$$\cos 2\beta = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \varphi, \quad (17)$$

где $\varphi = \varphi_r - \varphi_i$ (φ_i, φ_r — азимутальные углы между нормалью к поверхности и волновыми векторами падающего и отраженного излучения соответственно),

$$\cos \theta_N = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \beta}. \quad (18)$$

Выражение для компоненты $f_{dep}^{mod}(\gamma)$ материала, описывающей рассеяние деполяризованного излучения, в данной модели представляется в виде [6, 7]:

$$f_{dep}^{mod}(\gamma) = \rho_D + \frac{2\rho_V}{\cos \theta_i + \cos \theta_r}, \quad (19)$$

где $\rho_D, \rho_V, \text{cp}^{-1}$ – параметры, описывающие как ламбертовское поверхностное, так и неламбертовское многократное объемное рассеяние на подповерхностных неоднородностях материала соответственно.

Значения показателя преломления n и главного показателя поглощения k исследованных терморегулирующих покрытий, а также параметры модели $B, \sigma, \tau, \Omega, \rho_D$ и ρ_V , необходимые для расчета их $f_{pol}^{mod}(\gamma)$ (см. формулу (14)) и $f^{mod}(\gamma)$, были определены ранее [10, 11]. С использованием этих данных были рассчитаны значения компонент $f_{pol}^{mod}(\gamma)$ и $f_{dep}^{mod}(\gamma)$ (см. формулу (19)) модельной функции [6]:

$$f^{mod}(\gamma) = f_{pol}^{mod}(\gamma) + f_{dep}^{mod}(\gamma) \quad (20)$$

для данных материалов в зависимости от угла поворота образцов.

Получено хорошее соответствие между рассчитанными по модели $f_{pol}^{mod}(\gamma), f_{dep}^{mod}(\gamma)$ и полученными экспериментально $f_{pol}(\gamma), f_{dep}(\gamma)$ компонентами функции распределения двунаправленного коэффициента отражения терморегулирующих покрытий, которые описывают отражение поляризованной и деполяризованной составляющих излучения. Соответствие рассчитанных $f_{pol}^{mod}(\gamma)$ и определенных на основе измерений $f_{pol}(\gamma)$ серебристого покрытия ВЭ-30 и зеленой краски АК-512з представлены на рис. 3. Это дополнительно подтверждает применимость модели [6] к условиям освещения терморегулирующих покрытий поляризованным излучением и адекватность установленных параметров, характеризующих исследуемые образцы [11].

На основе экспериментальных измерений и расчетов с использованием выражений (11) и (20), были найдены функции распределения двунаправленного коэффициента отражения исследованных материалов в случае их освещения неполяризованным излучением. Результаты определения $f(\gamma)$ и $f^{mod}(\gamma)$ ряда материалов представлены на рис. 4. Наблюдается очень хорошее соответствие между результатами расчета и измерений. Различие значений функции распределения двунаправленного коэффи-

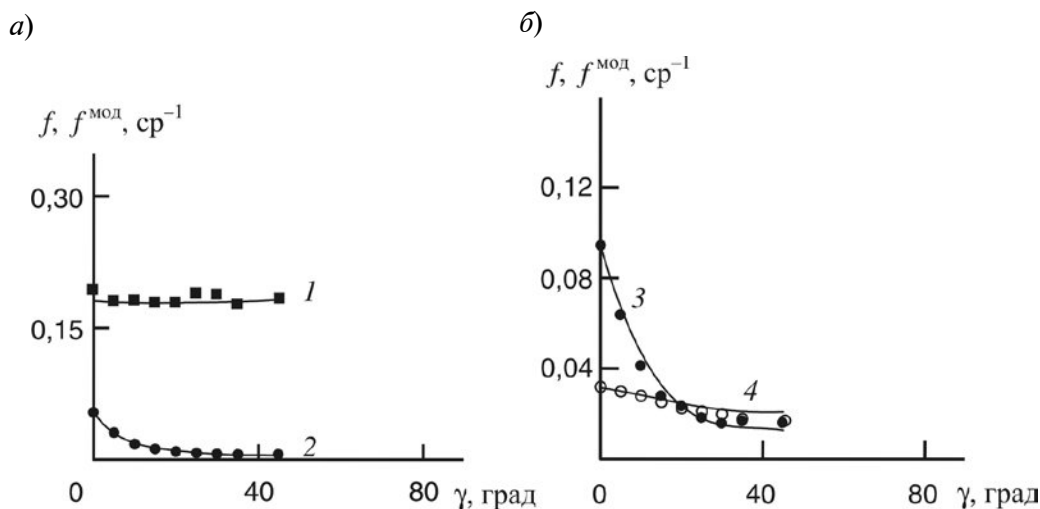


Рис. 4. Экспериментальные (символы) и расчетные (линии) зависимости функции распределения $f(\gamma)$ для различных материалов от угла поворота образцов при их освещении неполяризованным излучением:

1 – белое покрытие КО-5191; 2 – черное покрытие АК-512; 3 – углеродистик КМУ-4; 4 – зеленая краска АК-512з; при расчете $f^{mod}(\gamma)$ использованы выражения (13) – (19) и те же параметры, что на рис. 3

циента отражения исследованных материалов, полученных обоими способами, не превышает 15 %.

Таким образом, изучены закономерности отражения назад материалами и покрытиями, используемыми в изделиях аэрокосмической техники. Покрытия освещались линейно-поляризованным из-

лучением гелий-неонового лазера с рабочей длиной волны 632,8 нм. Показано, что наблюдается хорошее соответствие между результатами измерения функциональной зависимости распределения двунаправленного коэффициента отражения исследованных материалов от угла поворота образцов и ее расчета с использованием модели [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tyo J.S., Goldstein D.L., Chenault D.B., Shaw J.A.** Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications // *Appl. Opt.* 2006. Vol. 45 (22). P. 5453–5469.
2. **Chun C.S.L., Sadjadi F.A.** Polarimetric laser radar target classification // *Opt. Lett.* 2005. Vol. 30 (14). P. 1806–1808.
3. **Xu S., Xu L., Chen Y.** Space targets detecting oriented method of materials differentiating // *Advanced Materials Research.* 2011. Vol. 187. P. 637–640.
4. **Giakos G.C., Medithe A., Sumrain S., Sukumar S., Fraiwan L., Orozco A.** Laser polarimetric imaging of surface defects of semiconductor wafers, microelectronics, and spacecraft structures // *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement.* 2006. Vol. 55 (6). P. 2126–2131.
5. **Giakos G.C., Patnekar N., Fraiwan L., Sumrain S., Mertzios G.B., Periyathamby S.** A sensitive optical polarimetric imaging technique for surface defects detection of aircraft turbine engines // *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement.* 2004. Vol. 53 (1). P. 216–222.
6. **Shell II, J.R.** Polarimetric remote sensing in the visible to near infrared. PhD thesis: Rochester, Rochester Institute of Technology, 2005. 283 p.
7. **Schott, J.R.** Fundamentals of polarimetric remote sensing. Vol. TT81, SPIE Tutorial Texts In Optical Engineering. Bellingham: SPIE Press, 2009. 244 p.
8. **Bowers D.L., Wellem L.D., Duggin M.J., Glass W., Vaughan L.G.** Broadband spectral-polarimetric BRDF scan system and data for spacecraft materials // *Proc. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Techn. Conf. Maui, Hawaii.* 2011. P. E47–E55.
9. **Wang H., Zhang W., Wang F.** Visible characteristics of space-based targets based on bidirectional reflection distribution function // *Science China Technological Sciences.* 2012. Vol. 55 (4). P. 982–989.
10. **Воцула И.В., Длугунович В.А., Жумарь А.Ю., Царюк О.В.** Двунаправленное отражение поляризованного лазерного излучения теплозащитными материалами и терморегулирующими покрытиями // *Инженерно-физический журнал.* 2012. Т. 85. № 2. С. 430–436.
11. **Воцула И.В., Длугунович В.А., Жумарь А.Ю.** Угловое распределение нормированных коэффициентов рассеяния терморегулирующих покрытий и теплозащитных материалов, освещаемых поляризованным излучением // *Журнал прикл. спектроскопии.* 2013. Т. 80. № 2. С. 203–210.
12. **Кондрашов Э.К., Семенова Л.В., Кузнецова В.А., Малова Н.Е., Лебедева Т.А.** Развитие авиационных лакокрасочных материалов // *Все материалы: Энциклопедический справочник.* 2012. № 5. С. 49–54.
13. **Tribble A.C., Lukins R., Watts E., Naumov S.F., Sergeev V.K.** Low Earth orbit thermal control coatings exposure flight tests: A comparison of U.S. and Russian results. NASA Contractor Report 4647, 1995. 57 p.
14. **Михайлов М.М.** Светимость космических аппаратов. Зависимость отражательной способности материалов от угла падения оптического излучения // *Физ. и химия обраб. матер.* 2010. № 1. С. 23–28.
15. **Vasiliev V.N.** Methods and results of measurement of reflectance and emissivity properties of spacecraft coatings and materials // *Proc. of the 9th Intern. Symp.: Materials in a Space Environment.* Noordwijk: ESA Publications Division. 2003. P. 699–701.
16. **Длугунович В.А., Снопко В.Н., Царюк О.В.** Лазерный гониофотометрический Стокс-поляриметр // *Журнал прикл. спектроскопии.* 1999. Т. 66. № 6. С. 869–874.
17. **Nicodemus F.E., Richmond J.C., Hsia J.J., Ginsberg I.W., Limperis T.** Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. NBS Monograph 160, Washington. D.C.: National Bureau of Standards, 1977. 52 p.
18. **Длугунович В.А., Круплевич Е.А., Снопко В.Н.** Формирование пространственно-поляризационных характеристик излучения, отраженного шероховатой поверхностью непрозрачных материалов // *Оптика и спектроскопия.*

1992. Т. 73. № 4. С. 785–790.

19. **Менделеев В.Я.** О границах применимости модели Бугера для анализа оптических отражательных характеристик шероховатых металлических поверхностей // *Оптический журнал*. 1995. Т. 62. № 2. С. 22–26.

20. **Le Hors L., Hartemann P., Dolfi D., Breugnot**

S. Phenomenological model of paints for multispectral polarimetric imaging // *Proc. SPIE*. 2001. Vol. 4370. P. 94–105.

21. **Cai X., Chen Y., Chen L., Li W.** Polarization characteristic of laser backscattering from randomly rough surfaces // *Proc. SPIE*. 2009. Vol. 7382. P. 73821Y-1–73821Y-7.

REFERENCES

1. **Tyo J.S., Goldstein D.L., Chenault D.B., Shaw J.A.** Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications. *Appl. Opt.*, 2006, vol. 45 (22), pp. 5453–5469.

2. **Chun C.S.L., Sadjadi F.A.** Polarimetric laser radar target classification. *Opt. Lett.*, 2005, vol. 30 (14), pp. 1806–1808.

3. **Xu S., Xu L., Chen Y.** Space targets detecting oriented method of materials differentiating. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 187, pp. 637–640.

4. **Giakos G.C., Medithe A., Sumrain S., Sukumar S., Fraiwan L., Orozco A.** Laser polarimetric imaging of surface defects of semiconductor wafers, microelectronics, and spacecraft structures. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 2006, vol. 55 (6), pp. 2126–2131.

5. **Giakos G.C., Patnekar N., Fraiwan L., Sumrain S., Mertzios G.B., Periyathamby S.** A sensitive optical polarimetric imaging technique for surface defects detection of aircraft turbine engines. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 2004, vol. 53 (1), pp. 216–222.

6. **Shell II, J.R.** Polarimetric Remote Sensing in the Visible to Near Infrared. PhD thesis, Rochester, Rochester Institute of Technology, 2005, 283 p.

7. **Schott, J.R.** Fundamentals of polarimetric remote sensing. Vol. TT81, SPIE Tutorial Texts In Optical Engineering, Bellingham, SPIE Press, 2009, 244 p.

8. **Bowers D.L., Wellems L.D., Duggin M.J., Glass W., Vaughan L.G.** Broadband spectral-polarimetric BRDF scan system and data for spacecraft materials. *Proc. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Techn. Conf.*, Maui, Hawaii, 2011, pp. E47–E55.

9. **Wang H., Zhang W., Wang F.** Visible characteristics of space-based targets based on bidirectional reflection distribution function. *Science China Technological Sciences*, 2012, vol. 55 (4), pp. 982–989.

10. **Voschula I.V., Dlugunovich V.A., Zhumar A.Yu.** Dvunapravlennoe otrazhenie polarizovannogo lazernogo izlucheniia teplozashchitnymi materialami i termoreguliruiushchimi pokrytiiami. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, Vol. 85, No. 2, pp. 430–436. (rus)

11. **Voschula I.V., Dlugunovich V.A., Zhumar**

A.Yu. Uglovoe raspredelenie normirovannykh koefitsientov rasseianiia termoreguliruiushchikh pokrytii i teplozashchitnykh materialov, osveshchaemykh polarizovannym izlucheniem. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2013, Vol. 80, No. 2, pp. 203–210. (rus)

12. **Kondrashov E.K., Semenova L.V., Kuznetsova V.A., Malova N.E., Lebedeva T.A.** Razvitiie aviatsionnykh lakokrasochnykh materialov. *Vse materially: Entsiklopedicheskii spravochnik*, 2012, No. 5, pp. 49–54. (rus)

13. **Tribble A.C., Lukins R., Watts E., Naumov S.F., Sergeev V.K.** Low Earth orbit thermal control coatings exposure flight tests: A comparison of U.S. and Russian results. NASA Contractor Report 4647, 1995, 57 p.

14. **Mikhailov M.M.** Svetimost' kosmicheskikh apparatov. Zavisimost' otrazhatel'noi sposobnosti materialov ot ugla padeniia opticheskogo izlucheniia. *Fizika i khimiiia obrabotki materialov*, 2010, No. 1, pp. 23–28. (rus)

15. **Vasiliev V.N.** Methods and results of measurement of reflectance and emissivity properties of spacecraft coatings and materials. *Proc. of the 9th Intern. Symp.: Materials in a Space Environment*, Noordwijk, ESA Publications Division, 2003, pp. 699–701.

16. **Dlugunovich V.A., Snopko V.N., Tsariuk O.V.** Lazernyi goniofotometricheskii Stoks-polarimetr. *Journal of Applied Spectroscopy*, 1999, Vol. 66, No. 6, pp. 869–874. (rus)

17. **Nicodemus F.E., Richmond J.C., Hsia J.J., Ginsberg I.W., Limperis T.** Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. NBS Monograph 160, Washington, D.C.: National Bureau of Standards, 1977, 52 p.

18. **Dlugunovich V.A., Kruplevich E.A., Snopko V.N.** Formirovanie prostranstvenno-polarizatsionnykh kharakteristik izlucheniia, otrazhennogo sherokhovatoi poverkhnost'iu neprozrachnykh materialov. *Optics and Spectroscopy*, 1992, Vol. 73, No. 4, pp. 785–790. (rus)

19. **Mendelev V.Ya.** O granitsakh primenimosti modeli Bугera dlia analiza opticheskikh otrazhatel'nykh kharakteristik sherokhovatykh metallicheskih poverkhnostei. *Journal of Optical Technology*, 1995, Vol. 62, No. 2, pp. 22–26. (rus)

20. Le Hors L., Hartemann P., Dolfi D., Breugnot S. Phenomenological model of paints for multispectral polarimetric imaging. *Proc. SPIE*, 2001, vol. 4370, pp. 94–105.

21. Cai X., Chen Y., Chen L., Li W. Polarization characteristic of laser backscattering from randomly rough surfaces. *Proc. SPIE*, 2009, vol. 7382, pp. 73821Y-1–73821Y-7.

ВОЩУЛЯ Игорь Владимирович — младший научный сотрудник Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

220072, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68

ДЛУГУНОВИЧ Вячеслав Андреевич — доктор физико-математических наук, заведующий научно-испытательной лабораторией лазерной техники и поляриметрии Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

220072, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68

v.dlugunovich@dragon.bas-net.by

ЖУМАРЬ Андрей Юрьевич — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

220072, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68