



Научная статья  
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)  
УДК 655.3

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.033



## ПЛЕОХРОИЗМ БЕСЦВЕТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Владислав Юрьевич Верещагин <sup>1</sup>, Александра Юрьевна Погиба <sup>2</sup>,  
Александр Петрович Кондратов <sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>1</sup> slavaver@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1344-4888>

<sup>2</sup> pogiba.a@yandex.ru., <https://orcid.org/0009-0008-6550-2892>

<sup>3</sup> apkrezerov@mail.ru., <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

**Аннотация.** Исследуются оптические характеристики светоотражающих поверхностей, двойное лучепреломление и эффект плеохроизма в многослойных покрытиях металлической, стеклянной и пластиковой упаковки, изготовленной из двуосно-ориентированного изотактического полипропилена (ДОПП) отечественного производства. Двойное лучепреломление, порождающее эффект плеохроизма в пленках ДОПП, обуславливает изменение цвета отраженного света при условии поляризации света. Поляризованный свет появляется в результате отражения от зеркальной поверхности естественного или искусственного освещения. Доля поляризованного излучения в отраженном потоке света зависит от угла его падения на объект и свойств зеркальной диэлектрической поверхности. Предложено использовать цветные эффекты в полимерных пленках для создания привлекательного вида упаковки и её защитной маркировки. Защита упаковки товаров от фальсификации является важной социальной и экономической проблемой современного общества. Защитная маркировка в сочетании с кодированием информации обеспечивает безопасность потребителя товаров химической промышленности и едкой бытовой химии, и получение дохода производителями высокотехнологичной и наукоемкой продукции. Кодирование и возможность гарантированного распознавания защитной информации на прозрачной полимерной упаковке зависит от контраста и цветового различия структурных элементов штрихового кода или товарного знака. В статье приведены результаты инструментальных измерений и количественных оценок отраженного излучения. Установлено оптимальное количество слоёв прозрачной полимерной плёнки для достижения необходимого контраста защитной маркировки. Необходимые результаты достигаются с использованием плёнок крупнотоннажных полимеров, производимых отечественной химической промышленностью и широко применяемых в упаковке товаров.

**Ключевые слова:** Маркировка товаров химической промышленности, упаковка бытовой химии, полимерные покрытия, полипропилен, анизотропия, плеохроизм, двойное лучепреломление, координаты цвета, светлота, отражение света

**Благодарности:** Настоящее исследование проведено при финансовой поддержке Московского Политехнического Университета в рамках гранта имени В.Е. Фортова.

**Для цитирования:** Верещагин В. Ю., Погиба А. Ю., Кондратов А. П. Плеохроизм бесцветных полимерных покрытий на светоотражающей поверхности // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 214–219. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.033. EDN: <https://elibrary.ru/MSPEYR>.

Original article

## PLEOCHROISM OF COLORLESS POLYMER COATINGS ON A REFLECTIVE SURFACE

Vladislav Yu. Vereshchagin <sup>1</sup>, Alexandra Yu. Pogiba <sup>2</sup>, Alexander P. Kondratov <sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Moscow Polytechnic University

<sup>1</sup> slavaver@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1344-4888>

<sup>2</sup> pogiba.a@yandex.ru., <https://orcid.org/0009-0008-6550-2892>

<sup>3</sup> apkrezerov@mail.ru., <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

**Abstract.** The optical characteristics of reflective surfaces, double refraction and pleochroism effect in multilayer coatings of metal, glass and plastic packaging made of biaxially oriented isotactic polypropylene (BOPP) of domestic production are investigated. The double-ray refraction generating pleochroism effect in BOPP films causes the color change of reflected light under the condition of light polarization. Polarized light appears because of reflection from a mirror surface of natural or artificial illumination. The share of polarized radiation in the reflected light flux depends on the

© Верещагин В. Ю., Погиба А. Ю., Кондратов А. П., 2025

## ПЛЕОХРОИЗМ БЕСЦВЕТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

angle of its incidence on the object and the properties of the mirror dielectric surface. It is proposed to use color effects in polymer films to create an attractive appearance of packaging and its protective marking. Protection of goods packaging from adulteration is an important social and economic problem of modern society. Protective labeling in combination with information coding provides consumer safety of goods of chemical industry and caustic household chemicals, in particular income generation by manufacturers of high-tech and knowledge-intensive products. Coding and the possibility of guaranteed recognition of protective information on transparent polymer packaging depends on the contrast and color difference of structural elements of the bar code or trademark. The paper presents the results of instrumental measurements and quantitative estimates of reflected radiation. The optimal number of layers of transparent polymer film to achieve the necessary contrast of protective marking is established. The necessary results are achieved using films of large-tonnage polymers produced by the domestic chemical industry and widely used in the packaging of goods.

**Keywords:** Chemical labeling, packaging of household chemicals, polymer coatings, polypropylene, anisotropy, pleochroism, double refraction, color coordinates, lightness, light reflection

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Moscow Polytechnic University within the framework of the grant named after Vladimir Fortov.

**For citation:** Vereshchagin, V. Yu., Pogiba, A. Yu. & Kondratov, A. P. (2025). Pleochroism of colorless polymer coatings on a reflective surface. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 214-219. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.033. EDN: <https://elibrary.ru/MSPEYR>.

### ВВЕДЕНИЕ

Маркировка и защита упаковки товаров от фальсификации является важной социальной и экономической проблемой современного общества. Защитная маркировка промышленных товаров в сочетании с кодированием информации обеспечивает безопасность потребителя и сохранение прибыли производителям брендов - уникальной, высокотехнологичной и наукоемкой продукции. Многоцветные отражающие свет оптические метки на изделиях легко обнаруживаются невооруженным глазом и, по мнению экспертного сообщества, являются наиболее привлекательными для быстрой и надежной идентификации упакованного продукта или изделия [1].

С помощью скрытого знака на изделии или упаковке, который может иметь вид яркой и многоцветной пиктограммы, логотипа, товарного знака, фигуры, графического символа или цифры [2] существенно повышается эффективность борьбы с контрафактным производством и защита от подделки.

Технология маркировки изделий на металлических поверхностях и инструментальной идентификации широко применяется в разных отраслях промышленности. Например, в автомобильной промышленности метки используются для мониторинга деталей и компонентов по всей сборочной линии, что улучшает контроль материальных запасов и облегчает профилактическое обслуживание. Аналогичным образом, в логистике и управлении цепочками поставок метки прикрепляются к товарам, хранящимся в металлических контейнерах, обеспечивая точное управление запасами на этапах транспортировки и хранения [3, 4].

Получить цветные изображения на упаковке или полимерном покрытии изделия без применения пигментов и красителей можно при использовании интерференции при толщине пленки менее длины цуга волн или двойного лучепреломления поляризованного света, образующегося при отражении и распространении в диэлектрических слабо поглощающих (прозрачных) структурах. Интерференция света обуславливает т.н. структурные цвета, распространенные в природе и замечаемые, например, на крыльях и телах насекомых. Структурный цвет является следствием многократных преломлений и отражений солнечного света от многослойных рельефных поверхностей тонких пленок из природных органических полимерных материалов [5, 6]. Изучению, моделированию и воспроизведению структурных цветов с по-

мощью синтетических органических полимерных материалов посвящено множество экспериментальных исследований [7-9].

Цель настоящего исследования обоснование возможности использования пленок двуосноразованного изотактического полипропилена для информационной и защитной маркировки товаров массового потребления и продуктов химической промышленности в упаковке (таре) из стекла, металла или пластмасс с зеркальной поверхностью.

### МЕТОДЫ

Цветовые координаты CIELAB для оценки окраски пленки получены с помощью фотографирования и обработки цифровых фотографий. Экспериментальная установка состояла из светового короба, держателя объекта, цифровой камеры Canon EOS 500D (рис. 1). Камера настроена на сохранение изображений в формате RAW.

Лентообразные образцы пленок полипропилена в форме стопы Столетова фотографировали через пленочный поляризатор, располагаемый поверх пакета пленок в двух перпендикулярных направлениях оси поляризации света - в закрытом или открытом положении [10]. Фотокамеру установили с возможностью изменения угла обозрения и фотографирования цветовых эффектов, возникающих при отражении дневного света от зеркал в различных направлениях.

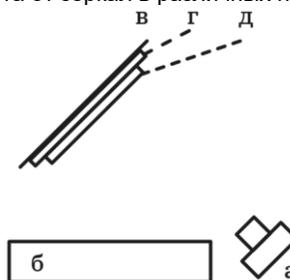


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: а – фотокамера, б – световой короб, в – отражающая поверхность, г – образцы пленок полипропилена, д – пленочный поляризатор

Figure 1 – Experimental setup diagram: a – camera, б – light box, в – reflective surface, д – polypropylene film samples, e – film polarizer

Стабильная цветопередача во всем наборе данных обеспечена калибровкой цвета с использованием

стандартизированной мишенью X-Rite ColorChecker Passport, которая фотографировалась в начале каждого сеанса фотографирования. Объекты для съемки представляли собой полимерные пленки, совмещенные в стопы Столетова, проявляющие плеохроизм при размещении на различных отражающих поверхностях. Все изображения были получены в условиях контролируемого освещения для поддержания постоянства в течение всей экспериментальной процедуры.

Обработка RAW-изображений производилась с помощью программного обеспечения Darktable с открытым исходным кодом, которое обеспечивает точное управление цветом и калибровку рабочих процессов. Пользовательский цветовой профиль был создан с помощью модуля цветовой калибровки (Color Calibration) в Darktable, реализующего стратегию оптимизации, основанную на минимизации среднего  $\Delta E$  (цветового различия). Этот подход был выбран для обеспечения равномерного распределения цветовых ошибок по всему цветовому охвату при минимизации различий в восприятии цветов. Алгоритм оптимизации вычислял оптимальные параметры путем итеративного уменьшения расхождения между эталонными значениями сцены (ColorChecker Passport) и цветовым откликом камеры в конкретных условиях освещенности.

Полученный цветовой профиль был впоследствии применен ко всем цифровым фотографиям в наборе данных. Обработанные изображения были экспортированы в 16-битные файлы TIFF без сжатия с использованием цветового пространства AdobeRGB для поддержания широкого цветового охвата и сохранения точности цветопередачи. Высокая битовая глубина обеспечивает минимальные ошибки квантования и сохраняет тонкие цветовые вариации, характерные для плеохроичных эффектов.

Для получения цветовых координат  $L^*$ ,  $a^*$  и  $b^*$  значения на цифровых фотографиях (рис. 2) брались в области интереса размером 5×5 пикселей, что позволяет усреднить значения и подавить случайный шум, что дает колориметрические данные для последующего анализа плеохроизма многослойных полимерных пленок.

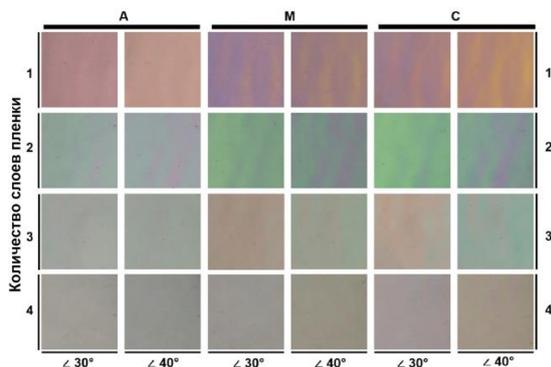


Рисунок 2 – Цвет ДОПП пленок при угле отражения 30° и 40° между источником света и фотокамерой на различных светоотражающих поверхностях: А – акриловая; М – стальная; С – стеклянная поверхность

Figure 2 – The color of BOPP films at a reflection angle of 30° and 40° between the light source and the camera on various reflective surfaces: A – acrylic; M – steel; C – glass surface

Расчет цветового различия пленок проводили по формуле 1:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2} \quad (1)$$

где  $L^*$  - светлота,  $a^*$  - координаты красно-зеленого оттенка,  $b^*$  координаты желто-синего оттенка, согласно цветовому пространству CIE1976  $L^*a^*b^*$  [10]. Индексы представляют цветовые значения CIE Lab двух цветов.

Спектральные характеристики светоотражающих поверхностей, стеклянного акрилового и стального зеркал и ДОПП получали с помощью спектрофотометра X-Rite i1Pro с модулем командной строки spotread из ArgyllCMS версии 2.3.0. Схема измерения спектра отражения света от поверхности образца в спектрофотометре представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема измерения спектра отражения света от поверхности образца (зеркала) в спектрофотометре X-Rite i1Pro

Figure 3 – Measurement scheme of the light reflection spectrum from the sample surface (mirror) in an X-Rite i1Pro spectrophotometer

Спектральные характеристики отражающих поверхностей приведены на рисунке 4.

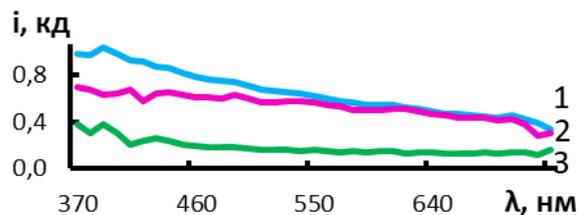


Рисунок 4 – Спектральные характеристики отражающих поверхностей: 1 – акрил, 2 – стекло, 3 – сталь

Figure 4 – Spectral characteristics of reflective surfaces: 1 – acrylic, 2 – glass, 3 – steel

## ПЛЕОХРОИЗМ БЕСЦВЕТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Спектральные характеристики ДОПП (рис. 5) получены размещением 4-слойного пакета пленок на различных видах светоотражающих поверхностей: акриловое, стеклянное и металлическое зеркало, и измерения проводились через пленочный поляризатор.

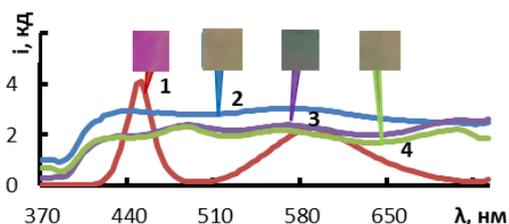


Рисунок 5 – Спектральные характеристики и цвет пакета из 4-х слоев пленки ДОПП в проходящем свете (1) и на отражающей поверхности акрилового (2), стеклянного (3) и стального (4) зеркал

Figure 5 – Spectral characteristics and color of a package of 4 layers of BOPP film in a passing stream of polarized light (1) and on the reflective surface of acrylic (2), glass (3) and steel (4) mirrors

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для объективной оценки отличия окраски образца и фона (цвет, полученный путем размещения поляризатора на отражающей поверхности) было рассчитано стандартное цветовое различие  $\Delta E$  – величина, определенная на разности координат цвета двух сравниваемых объектов [11]. Предполагается, если  $\Delta E$  варьируется в пределах 1,5-2 единиц, то человеческий глаз не может отличать цвета друг от друга [12], а следовательно защитная маркировка полимерной упаковки, металлической или стеклянной тары будет бесполезной при визуальном определении подлинности товара.

Результаты расчета цветового отличия между покрытой поляризатором ДОПП пленкой, размещенной на светоотражающей поверхности и бесцветной прозрачной пленкой при различных углах отражения  $\phi$  между источником света и фотокамерой представлены в таблице 1. Наибольшим цветовым отличием, обусловленным плеохроизмом отражающего покрытия при косом обозрении, характеризуется стеклянная тара с монопленкой полипропилена.

Таблица 1 – Показатель цветового отличия  $\Delta E$  между пленкой и фоном

Table 1 – The indicator of the color difference  $\Delta E$  between the film and the background

Материал поверхности		Акрил		Сталь		Стекло	
Угол отражения $\phi$ между источником света и фотокамерой		30°	40°	30°	40°	30°	40°
Количество слоев пленки (ДОПП)	1	45	39	47	46	48	47
	2	35	34	44	45	41	45
	3	33	36	37	39	35	34
	4	36	40	41	39	40	37

Наибольшим цветовым отличием между «фоном» (рис. 6) и пленкой при прямом наблюдении обладает однослойное комбинированное полимерное покрытие на поверхности полимерной (акриловой) и стеклянной тары.

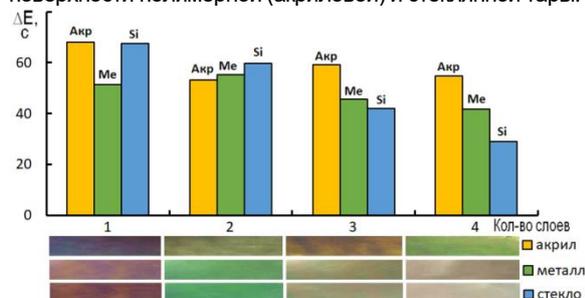


Рисунок 6 – Цветовое отличие от фона ( $\Delta E$ ) многослойного покрытия из пленки полипропилена (ДОПП) на акриловой, стальной и стеклянной таре при нормальном отражении от поверхности

Figure 6 – Color difference of a polypropylene film coating (BOPP) on acrylic, steel and glass surfaces at normal reflection from the surface

Изменение цвета происходит по мере увеличения количества слоев пленки полипропилена. Цветовое отличие  $\Delta E$  при одинаковом количестве слоев пленки на различных светоотражающих поверхностях имеет разные значения. Отражающие материалы отличаются степенью поляризации излучения и по мере увеличения количества слоев снижается степень поляризации света, что приводит к снижению цветового отличия между многослойными пленками и фоном. Это различие следует учитывать при выборе материала тары для продук-

тов химической промышленности и конструировании её защитных элементов или упаковок.

Возможность инструментальной идентификации закодированной информации на прозрачной полимерной упаковке зависит от контраста и цветового различия структурных элементов штрихового кода или товарного знака, а заметность маркировки на зеркальной поверхности определяется их светлотой. Светлота, как мера интенсивности отраженного от зеркальной поверхности оптического излучения, проходящего сквозь несколько слоев полимерной пленки, снижается по мере увеличения толщины покрытия. Законом, описывающим ослабление параллельного пучка света при его распространении в поглощающей среде, является закон Ламберта-Бугера [13]. Этот закон, справедливый при малых интенсивностях, связывает интенсивность  $I$  пучка света, прошедшего через слой поглощающей среды толщиной  $l$ , с интенсивностью падающего пучка  $I_0$ :

$$I = I_0 \exp(-kl) \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент поглощения не зависит от интенсивности света и толщины поглощающего слоя [14].

Отношение  $I_0/I$  выражает ослабление интенсивности света и называется погашением [14]. Для проверки применимости закона Ламберта-Бугера к ослаблению светлоты многослойных полимерных покрытий в потоке поляризованного света исследовали её зависимость от количества слоев или суммарной толщины. Несоответствие зависимостей светлоты от толщины пленки закону Ламберта-Бугера, найденное на примере пакетов полупрозрачных пленок поливинилхлорида [15] подтверждается результатами спектрального и цифрового анализа светлоты 15 слоев пленок полипропилена в отраженном потоке поляризованного света (рис 7).

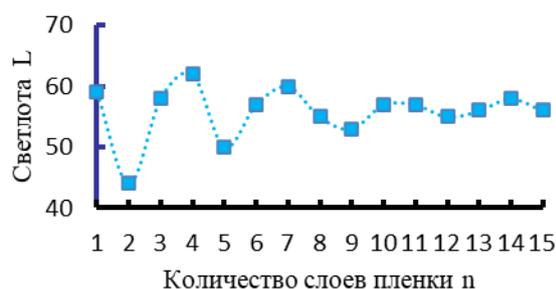


Рисунок 7 – Светлота цвета L в зависимости от количества слоёв пленки

Figure 7 – The lightness of the color L depends on the number of film layers

Полученный результат имеет важное практическое значение для декорирования и маркировки всех типов отражающих поверхностей тары. Светлота пакетов не убывает монотонно по мере увеличения числа слоёв и толщины пакета. Рассеяние света пакетами пленок полипропилена одинаковой толщины не существенно снижает светлоту и интенсивность их окраски даже при количестве слоёв покрытия, превышающем 15. Светлота пакета из 4 слоёв пленок полипропилена максимальна и незначительно превосходит светлоту монопленки.

Достаточно высокие, близкие к максимальным значения светлоты имеет пакет из 7 и 10 пленок. Максимальные значения цветовых различий соответствует монослою полипропилена на всех исследованных типах отражающих поверхностей (табл. 1).

### ВЫВОДЫ

1. Отражающие поверхности из стекла, металла и пластмасс покрытые бесцветными плёнками полипропилена (ДОПП) и пленочным поляризатором приобретают различный цвет при освещении объекта излучением белого цвета, а интенсивность и спектр отраженного излучения нелинейно зависят от количества слоёв пленки.

2. Селективная фильтрация поляризованного света бесцветными плёнками полипропилена, отражённого от зеркальной поверхности, позволяет получать различные цвета декоративных изделий и оптических фильтров без применения пигментов, красителей или цветных полимеров.

3. Количественные параметры цвета и светлота отраженного излучения от многослойных покрытий из полипропилена на отражающих поверхностях зависят от угла обозрения, ориентации оптической оси поляризации поляризатора.

4. Химический состав отражающих поверхностей (силикатного стекла, стали или пластмассы) влияет на цвет и интенсивность отражённого потока света. Наибольшее изменение цвета ( $\Delta E$  около 70 единиц) и интенсивность потока поляризованного света наблюдается при нормальном отражении от поверхности «акрилового зеркала» покрытого прозрачной бесцветной монопленкой полипропилена.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shruti A., Bage N., Kar P. Nanomaterials based sensors for analysis of food safety // *Food Chemistry*, 2024, 433, pp. 137284. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137284>
2. Pavlovska E., Gurska B., Voychik K. Labeling

packaging with environmental symbols // *Packaging review*, 2024, 2, pp. 6-12. doi: 10.15199/42.2024.2.1

3. Pereira E. et al. RFID tags for metal application: a brief overview // *Technologies*, 2024, 12, 5, p. 58. doi: <https://doi.org/10.3390/technologies12050058>

4. Liu Q., Li H., Yu Y. F. A versatile flexible UHF RFID tag for glass bottle labelling in self-service stores // *IEEE Access*, 2018, 6, pp. 59065-59073. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2874428

5. Rassart M., Colomer J.F., Tabarrant T., Vigneron J.P. Diffraction hygrochromic effect in the cuticle of the Hercules beetle *Dynastes hercules* // *New Physical Journal*, 2008, No. 10, 3, p. 033014. doi: 10.1088/1367-2630/10/3/033014

6. Xuan Z., Li J., Liu K., Yi F., Wang S., Lu W. Artificial structural colors and their application // *Innovations*, 2021, 2, 1. doi: 10.1098/rsif.2016.0933

7. Liu, F., Yin, H., Dong, B., Qing, Yu., Zhao, L., Meyer, S., Chen, B. Imperceptible structural coloration of the elytra of *Chlorophila obscuripennis* beetles (Coleoptera) // *Electronic physical review — Statistical, nonlinear physics and physics of soft substances*, 2008, pp. 77, 1, page 012901. doi: 10.1103/PhysRevE.77.012901

8. Дружинина Н.А., Муратова Н.М. Электронная маркировочная продукция // *Химическая промышленность сегодня*, 2020, № 3, С. 54-56.

9. Болотин, Б. М. Органические люминофоры с аномально большим сдвигом Стокса // *Химическая промышленность сегодня*, 2014, 1, С. 18-24.

10. Nikolaev A.A., Kondratov A.P. Method of hidden marking of transparent polypropylene film // *Fine Chemical Technologies*, 2022, vol. 17, No. 4, pp. 346-356. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-4-346-356>

11. Сулла С., Шишкин М.И. Измерение цвета: теория и практика // *Лакокрасочные материалы и их применение*, 2003, 7-8, С. 36-39.

12. Фурман Н.Н., Ваков В.В., Третьякова А.Е., Сафонов В.В. Возможность применения инструментальных методов для контроля цвета ряда декоративных покрытий // *Лакокрасочные материалы и их применение*, 2015, 5, С. 30-34.

13. Прохоров А.М. Физика. Большой энциклопедический словарь—4-е изд. М.: Большая Российская энциклопедия, 1999, 944 с.

14. Окатов М.А. Справочник технолога-оптика. СПб.: Политека, 2004, 679 с.

15. Kondratov A. P., Volinsky A. A., Chen J. The effect of scale on the color and transparency of multilayer polyethylene films in polarized light // *Achievements of Polymer Technology*, 2016, No. 17, 734, pp. 3741-3751. <https://doi.org/10.1002/adv.21708>

### Информация об авторах

В. Ю. Верещагин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокогнитивные технологии» Московского политехнического университета.

А. Ю. Погиба, преподаватель кафедры «Инновационных материалов принтмедиаиндустрии».

А. П. Кондратов Профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационных материалов принтмедиаиндустрии».

## ПЛЕОХРОИЗМ БЕСЦВЕТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

### REFERENCES

1. Shruti, A. & Bage, N. & Kar, P. (2024) Nanomaterials based sensors for analysis of food safety. *Food Chemistry*, 433, pp. 137284. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137284>
2. Pavlovska, E. & Gurska, B. & Voychik, K. (2024) Labeling packaging with environmental symbols. *Packaging review*, 2, pp. 6-12. doi: 10.15199/42.2024.2.1
3. Pereira, E. (2024) et al. RFID tags for metal application: a brief overview. *Technologies*, 12, 5, p. 58. doi: <https://doi.org/10.3390/technologies12050058>
4. Liu, Q. & Li, H. & Yu, Y. F. (2018) A versatile flexible UHF RFID tag for glass bottle labelling in self-service stores. *IEEE Access*, 6, pp. 59065-59073. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2874428
5. Rassart, M., Colomer, J.F., Tabarrant, T. & Vigneron J.P. (2008) Diffraction hygrochromic effect in the cuticle of the Hercules beetle *Dynastes Hercules*. *New Physical Journal*, No. 10, 3, p. 033014. doi: 10.1088/1367-2630/10/3/033014
6. Xuan, Z., Li, J., Liu, K., Yi, F., Wang, S. & Lu, W. (2021) Artificial structural colors and their application. *Innovations*, 2, 1. doi: 10.1098/rsif.2016.0933
7. Liu, F., Yin, H., Dong, B., Qing, Yu., Zhao, L., Meyer, S. & Chen, B. (2008) Imperceptible structural coloration of the elytra of *Chlorophila obscuripennis* beetles (Coleoptera). *Electronic physical review — Statistical, nonlinear physics and physics of soft substances*, pp. 77, 1, page 012901. doi: 10.1103/PhysRevE.77.012901
8. Druzhinina, N.A. & Muratova, N.M. (2020) Electronic marking products. *Chemical industry today*, No. 3, pp. 54-56. (In Russ.).
9. Bolotin, B.M. (2014) Organic phosphors with an abnormally large Stokes shift. *Chemical industry today*, 1, pp. 18-24. (In Russ.).
10. Nikolaev, A.A. & Kondratov, A.P. (2022) Method of hidden marking of transparent polypropylene film. *Fine Chemical Technologies*, vol. 17, No. 4, pp. 346-356. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-4-346-356>
11. Sulla, S. & Shishkin, M.I. (2003) Color measurement: theory and practice. *Paints and varnishes and their application*, 7-8, pp. 36-39. (In Russ.).
12. Furman, N.N., Vakor, V.V., Tretyakova, A.E. & Safonov V.V. (2015) Possibility of using instrumental methods for color control of a number of decorative coatings. *Paints and varnishes and their application*, 2015, 5, pp. 30-34. (In Russ.).
13. Prokhorov, A.M. (1999) *Physics. The Great Encyclopedic Dictionary – 4th ed.* Moscow: The Great Russian Encyclopedia (In Russ.). (In Russ.).
14. Okatov, M.A. (2004) *Handbook of Technology and Optics.* St. Petersburg: Politics (In Russ.). (In Russ.).
15. Kondratov, A. P. & Volinsky A. A. & Chen J. (2016) The effect of scale on the color and transparency of multilayer polyethylene films in polarized light. *Achievements of Polymer Technology*, No. 17, 734, pp. 3741-3751. <https://doi.org/10.1002/adv.21708>

### Information about the authors

V. Y. Vereshchagin, Candidate of Technical Sciences, Associate docent of the Department of «Infocognitive technologies» of Moscow Polytechnic University.

A. Y. Pogiba Lecturer at the Department of Innovative Materials of the Print Media Industry at Moscow Polytechnic University.

A. P. Kondratov Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Innovative Materials of the Print Media Industry at Moscow Polytechnic University.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 12 июля 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.*

*The article was received by the editorial board on 12 July 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.*