

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОКРАСОЧНОГО СЛОЯ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИМ ПРИБОРОМ

Е. Е. МАЙОРОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия
majorov_ee@mail.ru*

Аннотация. Представлен колориметрический прибор, определяющий не только уровень соответствия цвета исследуемого образца и эталона, но и обеспечивающий измерение оптических спектров отражения в области длин волн $\lambda = 380\text{—}760$ нм. Прибор с помощью специального программного обеспечения рассчитывает на основе спектральных данных координаты цвета объекта в интересующей колориметрической системе. Исследованы металлические пластины, покрашенные в белый металл, серебристый светло-серый, серебристо-зеленый, серебристо-красный, серебристо-черный цвета. Получены спектральные зависимости коэффициента диффузного отражения для каждого исследуемого образца.

Ключевые слова: *двудуговой полихроматор, колориметр, цвет, коэффициент диффузного отражения, интегрирующая сфера, диапазон длин волн*

Ссылка для цитирования: *Майоров Е. Е.* Измерение оптических параметров покрасочного слоя колориметрическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 413—419. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-413-419.

MEASURING THE PAINT LAYER OPTICAL PARAMETERS WITH A COLORIMETRIC INSTRUMENT

E. E. Maiorov

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia
majorov_ee@mail.ru*

Abstract. A colorimetric device is presented that determines not only the level of color correspondence between the test sample and the standard, but also provides measurements of optical reflection spectra in the wavelength range $\lambda = 380\text{—}760$ nm. The device uses special software to calculate, based on spectral data, the color coordinates of the object in a specified colorimetric system. Metal plates painted in white metallic, silver-light gray, silver-green, silver-red, silver-black colors were studied. Spectral dependences of the diffuse reflection coefficient for each sample under study are obtained.

Keywords: *double-beam polychromator, colorimeter, color, diffuse reflection coefficient, integrating sphere, wavelength range*

For citation: *Maiorov E. E.* Measuring the paint layer optical parameters with a colorimetric instrument. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 6. P. 413—419 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-413-419.

Введение. На сегодняшний день колориметрические приборы и системы пользуются огромным спросом в различных областях науки и техники, таких как химическая, биологическая, медицинская, экологическая и т.д. [1, 2]. Применение колориметра позволяет сравнивать цвета образца с эталоном, чтобы определить уровень их соответствия друг другу. Это может быть важно при подборе красок, например, при реставрационных работах на поврежденной части кузова автомобиля, чтобы отреставрированный фрагмент полностью совпадал не только по цвету, но и по оттенку [3, 4]. Таким образом, использование колориметра позволяет сэкономить на лакокрасочных материалах, избежав полного перекрашивания кузова автомобиля.

Колориметры нашли свое применение в строительстве и дизайнерском искусстве. Использование колориметрических технологий для контроля соответствия разных материалов и аксессуаров оттенку одного цвета важно для строительства или обустройства интерьера [5, 6]. На производствах колориметры обеспечивают контроль продукции с тем, чтобы разные партии соответствовали одному оптическому параметру.

Отдельным направлением применения колориметров является определение концентрации веществ. При растворении в жидкости разных веществ цвет раствора изменяется [7, 8], поэтому можно анализировать раствор на предмет соответствия его необходимой концентрации. Это обуславливает применение колориметра в пищевой и химической промышленности.

Современные колориметрические приборы не только сравнивают цвета исследуемого образца с эталоном, определяют уровень их соответствия друг другу, но проводят измерения оптических спектров пропускания (T) или(и) отражения (R) в области длин волн $\lambda = 380\text{—}760$ нм, а также рассчитывают на основе спектральных данных координаты цвета объекта в интересующей колориметрической системе [9, 10]. Это стало возможным благодаря включению в состав колориметра спектрофотометрического датчика. Более того, эти приборы, как правило, используют интегрирующую фотометрическую сферу, где излучатель и фотодетектор расположены за ее пределами [11, 12].

Целью настоящей работы явилось измерение оптических параметров образцов автомобильных красок разработанным колориметрическим прибором, использующим двуполостную интегрирующую сферу без экрана с двулучевым полихроматором.

Объект и метод исследования. Объектом исследования служили окрашенные металлические пластины популярных цветов автомобилей: белый металлик, серебристый светлосерый, серебристо-зеленый, серебристо-красный, серебристо-черный. В основном краски этих цветов выпускают фирмы Mobihel и Duxone. Образцы предоставлены одним из автосервисов Санкт-Петербурга, занимающимся покраской кузовов легковых автомобилей.

Спектры диффузного отражения измерялись на разработанном колориметре. Внешний вид прибора представлен на рис. 1.

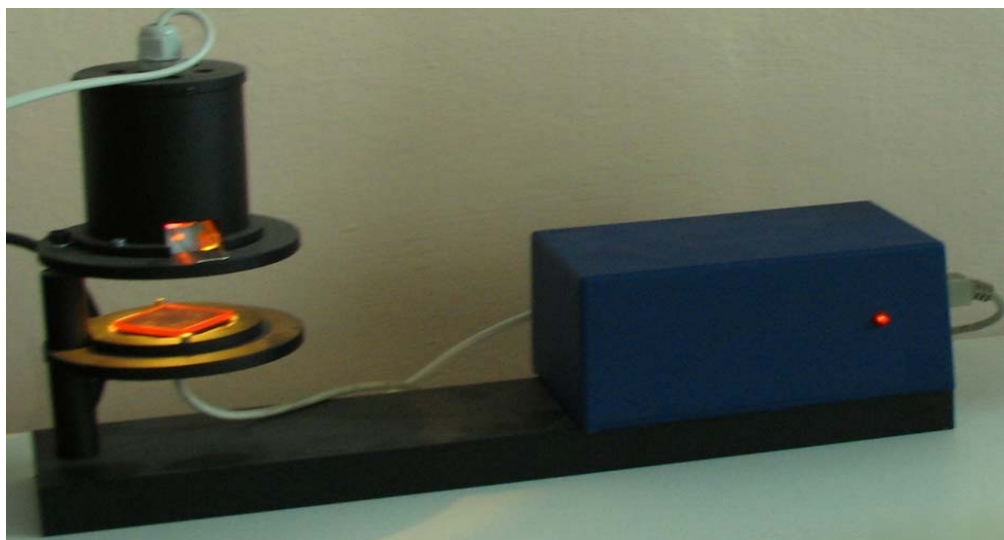


Рис. 1

В конструкции прибора использовалась схематически изображенная на рис. 2 двуполостная интегрирующая сфера, у которой отсутствует экран.

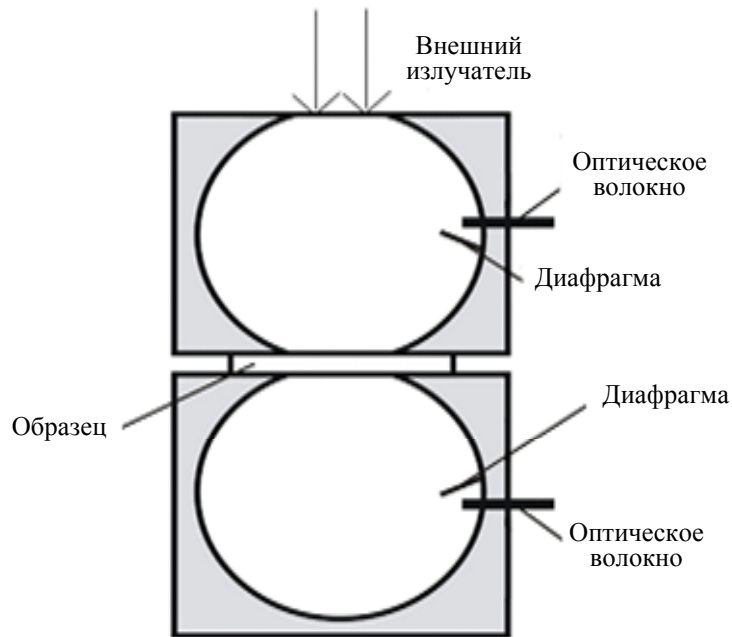


Рис. 2

Диаметр каждой полости 70 мм, диаметр входного и выходного портов 8 мм, коэффициент отражения внутренней поверхности сфер $R = 0,9$. В качестве источника излучения использовалась малогабаритная галогенная лампа накаливания (мощность 20 Вт, напряжение питания 12 В).

Такое конструктивное решение интегрирующей сферы представляет особый интерес, так как позволяет одновременно получить данные по диффузному отражению и пропусканию исследуемого объекта. В данной конфигурации использован внешний осветитель. Коллекторы на основе оптического волокна передают отраженное излучение в электронную систему сбора и обработки данных. Оба коллектора расположены горизонтально и закрыты диафрагмами. Для измерения спектров отражения $R(\lambda)$ исследуемых объектов посредством двуполостных интегрирующих сфер образец установлен между обеими интегрирующими сферами. При необходимости каналы отражения и пропускания могут быть разделены и использоваться независимо.

Распределение освещенности внутри двуполостной интегрирующей сферы, а также на поверхности образца рассчитывалось матричным методом [13, 14]. На внутренней поверхности сферы и образца выделялись кольцевые зоны. Направление излучения на соответствующие элементы зон (верхнюю и нижнюю поверхности образца, верхнюю и нижнюю части первой и второй сфер, верхнюю и нижнюю поверхности экрана) определяется конфигурационными особенностями сферы. Если обмена излучением между зонами нет, то сигнал АЦП отсутствует.

В состав прибора входят галогенная лампа накаливания, двулучевой спектрофотометр на основе полихроматора с оптоволоконными коллекторами для передачи отраженного излучения от поверхности исследуемого объекта. Спектрофотометр работал в диапазоне длин волн от 380 до 760 нм. В полихроматоре применялись вогнутые голографические дифракционные решетки, имеющие 600 штрихов на 1 мм и радиус кривизны $r = 12,5$ мм. Особенность полихроматора заключалась в установке дифракционных решеток, при которой они были смещены с круга Роуланда. Также использовалась одна ПЗС-линейка SONY ILX 511 на оба канала измерений. Внешний вид двулучевого полихроматора с электронным блоком и его структурная схема приведены на рис. 3.

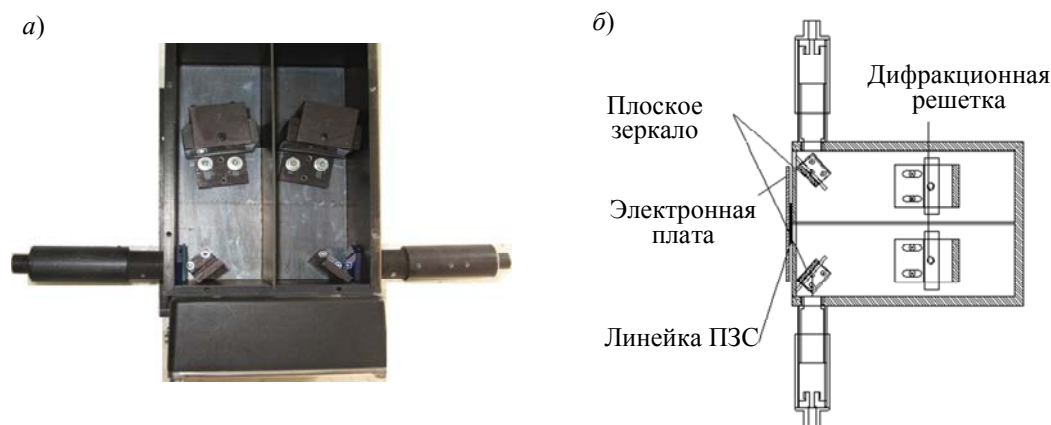


Рис. 3

На рис. 4 приведена последовательность определения коэффициента отражения, которая более подробно рассмотрена в [15]:

- измерение уровня „0“ отражения $R(0, 0, 0, 0)$;
- измерение уровня „100 %“ отражения $R(r_{std}, r_{std}, 0, 0)$ (r_{std} — коэффициент отражения эталона — молочно-матового стекла МС-20);
- измерение коэффициента отражения $R(r_s^{direct}, r_s, t_s^{direct}, t_s)$.

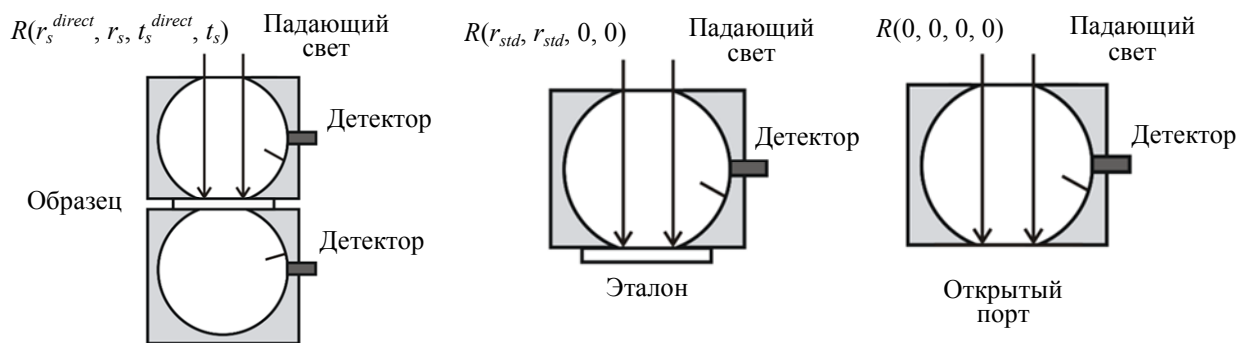


Рис. 4

Результирующий коэффициент отражения определялся по формуле:

$$R = r_{std} \cdot \frac{R(r_s^{direct}, r_s, t_s^{direct}, t_s) - R(0, 0, 0, 0)}{R(r_{std}, r_{std}, 0, 0) - R(0, 0, 0, 0)}.$$

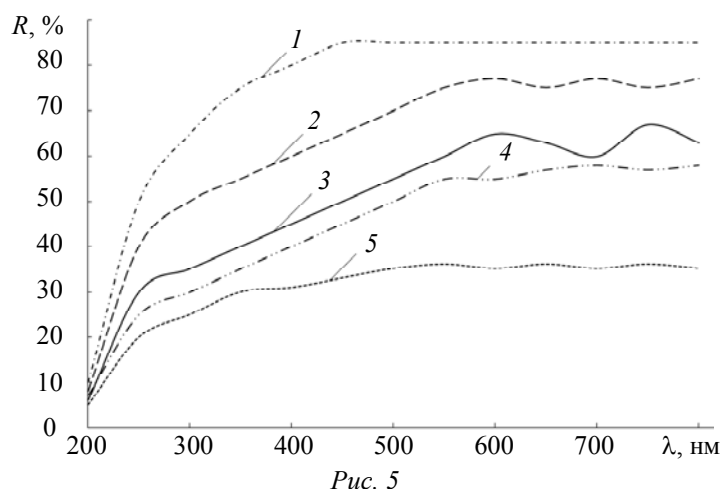
Оптические характеристики (коэффициент отражения) определялись с помощью специализированной программы IAD (Inverse adding-doubling).

Экспериментальные результаты. Представленный колориметр с двуполостной интегрирующей сферой и спектрофотометрическим датчиком был использован при исследовании металлических пластин, покрашенных в белый металл, серебристый светло-серый, серебристо-зеленый, серебристо-красный, серебристо-черный цвета. Образцы имели прямоугольную форму 1×1 см, высота вариации красочного рельефа 1 мм.

Спектральные зависимости R разных цветов представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что спектры отражения пластины цвета белый металл (кривая 1) в длинноволновой области $\lambda = 500\text{—}780$ нм имеют наибольшее отражение. Но в коротковолновой области спектра $\lambda = 380\text{—}420$ нм наблюдается падение R . У пластины серебристого светло-серого цвета (2) кривая спектральной зависимости $R(\lambda)$ расположена ниже и имеет максимум в диапазоне $\lambda = 620\text{—}780$ нм. Минимальное значение R зафиксировано в диапазоне $\lambda = 380\text{—}400$ нм. Далее пластина серебристо-зеленого цвета (3): кривая имела сложную форму распределения и на $\lambda = 630\text{—}780$ нм наблюдались всплески, где $R = 35\%$. Что касается пластины серебристо-красного цвета (4), то, как и у пластины светло-серого цвета, максимальное значение R за-

фиксировано в диапазоне $\lambda = 620\text{—}780$ нм. Пластина серебристо-черного цвета (5) имела самую низкую отражающую способность, и ее кривая распределения располагалась ниже, чем у всех предыдущих образцов.



По форме спектральные кривые отражения похожи, существенных сдвигов не наблюдалось.

Заключение. В работе проведены измерения нескольких образцов краски Mobihel и Duxone разработанным колориметрическим прибором. Получены спектральные зависимости исследуемых образцов. Определено, что у пластины цвета белый металл коэффициент диффузного отражения самый высокий, а у пластины серебристо-черный цвета самый низкий. В целом полученные результаты удовлетворяют требованиям практического использования. Полученные экспериментальные результаты представляют интерес для автомобилестроения и оптического приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юстова Е. Н. Цветовые измерения (Колориметрия). СПб: Изд-во СПбГУ, 2000. 397 с.
2. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Хохлова М. В., Курлов А. В., Черняк Т. А., Дагаев А. В., Фадеев А. О. Возможность использования колориметра с RGB-компонентами для исследований фотооптического отбеливания, тонирования и окрашивания бумаги // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 3. С. 22—29.
3. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Абрамян В. К., Зайцев Ю. Е., Хайдаров А. Г., Хайдаров Г. Г. Разработка колориметрического датчика с RGB-элементом и двуполостной оптоэлектронной интегрирующей сферой для контроля диффузно отражающих объектов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. 2017. Вып. 48, № 20 (269). С. 107—115.
4. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Хайдаров А. Г., Абрамян В. К., Зайцев Ю. Е. Разработка лабораторного спектрофотометра видимой области спектра для контроля жидкофазных сред // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 8. С. 42—46.
5. Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Туровская М. С., Литвиненко А. Н., Черняк Т. А., Дагаев А. В., Пушкина В. П., Пономарев С. Е. Применение разработанного колориметрического прибора для измерения геометрических параметров цвета стоматологических отбеливателей и его технико-экономическое обоснование // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 1. С. 54—59.
6. Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Попова Н. Э., Черняк Т. А., Курлов А. В., Дагаев А. В., Цыганкова Г. А. Исследование *in vivo* зубной эмали человека колориметрическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 4. С. 373—379. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-373-379.
7. Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Дагаев А. В., Ушакова А. С., Гулиев Р. Б., Хохлова М. В., Цыганкова Г. А., Писарева Е. А. Исследование спектров диффузного отражения образцов белой бумаги автоматизированным RGB колориметром // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 12. С. 14—22. DOI: 10.25791/pribor.12.2019.1062.

8. Кузьмина Д. А., Мендоса Е. Ю., Майоров Е. Е., Нарушак Н. С., Шаламай Л. И. Спектроскопия отражения тканей зубов *in vitro* и наногибридных реставрационных материалов // MEDICUS. Международный медицинский научный журнал. 2020. № 5 (35). С. 68—73.
9. Кузьмина Д. А., Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Нарушак Н. С. Использование метода спектроскопии отражения для распознавания подлинности стоматологических реставрационных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 1. С. 63—70. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-63-70.
10. Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Писарева Е. А., Хохлова М. В. Экспериментальное исследование разработанного колориметрического датчика для измерения цветности стекла // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 1(345). С. 131—137. DOI: 10.33979/2073-7408-2021-345-1-131-137.
11. Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Спектральные методы и средства исследований оптических свойств стоматологического материала на основе метилметакрилатных смол // Медицинская техника. 2021. № 6. С. 24—27.
12. Колесниченко С. В., Константинова А. А., Машек А. Ч., Майоров Е. Е., Писарева Е. А., Цыганкова Г. А. Фотометрия автомобильных моторных масел // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 6. С. 83—88. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-83-88.
13. Tardy H. L. Matrix method for integrating-sphere calculations // Optical Society of America. 1991. Vol. 8, N 9. P. 1411—1418.
14. Clare J. F. Comparison of four analytic methods for the calculation of irradiance in integrating spheres // Optical Society of America. 1998. Vol. 15, N 12. P. 3086—3096.
15. Pickering J. W., Prahl S. A., Wieringen N. van, Beek J. F., Sterenborg H. J. C. M., Gemert M. J. C. van. A Double integrating sphere system for measuring the optical properties of tissue // Applied Optics. 1993. Vol. 32. P. 399—410.

Сведения об авторе

Евгений Евгеньевич Майоров

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.22; одобрена после рецензирования 21.02.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. Yustova E.N. *Tsvetovyye izmereniya (Kolorimetriya) (Color Measurements (Colorimetry))*, St. Petersburg, 2000, 397 p. (in Russ.)
2. Mayorov E.E., Chernyak T.A., Dagaev A.V., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Khokhlova M.V., Kurlov A.V., Fadeev A.O. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2017, no. 3, pp. 22—29. (in Russ.)
3. Mayorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Abrahamyan V.K., Zaitsev Y.E., Khaidarov A.G., Khaidarov G.G. *Belgorod State University Scientific Bulletin Applied Mathematics & Physics*, 2017, no. 20(48), pp. 107—115. (in Russ.)
4. Mayorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Khaidarov G.G., Khaidarov A.G., Zaitsev Y.E., Abrahamyan V.K. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2016, no. 8, pp. 42—46. (in Russ.)
5. Mayorov E.E., Shalamay L.I., Turovskaya M.S., Litvinenko A.N., Chernyak T.A., Pushkina V.P., Dagaev A.V., Ponomarev S.E. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2018, no. 1, pp. 54—59. (in Russ.)
6. Prokopenko V.T., Mayorov E.E., Shalamay L.I., Popova N.E., Chernyak T.A., Kurlov A.V., Dagaev A.V., Tsygankova G.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 4(62), pp. 373—379, DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-373-379. (in Russ.)
7. Mayorov E.E., Shalamay L.I., Dagaev A.V., Ushakova A.S., Guliev R.B., Khokhlova M.V., Tsygankova G.A., Pisareva Y.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2019, no. 12, pp. 14—22, DOI: 10.25791/pribor.12.2019.1062. (in Russ.)
8. Kuzmina D.A., Mendosa E.Yu., Mayorov E.E., Narushak N.S., Shalamay L.I. *MEDICUS*, 2020, no. 5(35), pp. 68—73. (in Russ.)
9. Kuzmina D.A., Mayorov E.E., Shalamay L.I., Mendosa E.Yu., Narushak N.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 1(64), pp. 63—70, DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-63-70. (in Russ.)
10. Arefyev A.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V., Mayorov E.E., Pisareva E.A., Khokhlova M.V. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2021, no. 1(345), pp. 131—137, DOI: 10.33979/2073-7408-2021-345-1-131-137. (in Russ.)
11. Mayorov E.E., Shalamay L.I., Mendosa E.Yu., Lampusova V.B., Oksas N.S. *Biomedical Engineering*, 2021, no. 6, pp. 24—27. (in Russ.)
12. Kolesnichenko S.V., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Mayorov E.E., Pisareva E.A., Tsygankova G.A. *News of*

Tula State University. Technical Science, 2021, no. 6, pp. 83–88, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-83-88 (in Russ.)

13. Tardy H.L. *Optical Society of America*, 1991, no. 9(8), pp. 1411–1418.
14. Clare J.F. *Optical Society of America*, 1998, no. 12(15), pp. 3086–3096.
15. Pickering J.W., Prahl S.A., Wieringen N. van, Beek J.F., Sterenborg H.J.C.M., Gemert M.J.C. van, *Applied Optics*, 1993, vol. 32, pp. 399–410.

Data on author

Evgeny E. Maiorov — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: majorov_ee@mail.ru

Received 15.02.22; approved after reviewing 21.02.22; accepted for publication 25.04.22.