
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

УДК 535.6.08

© Е. Е. Майоров, А. В. Арефьев, Р. Б. Гулиев, В. П. Пушкина, Г. А. Цыганкова, 2023

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО
СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА
ДЛЯ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ
ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ RGB-КОМПОНЕНТЫ**

Работа посвящена исследованию разработанного спектрофотометрического датчика для колориметрических приборов, использующих оптоэлектронные RGB-компоненты. Зарубежные колориметры, в состав которых входят спектрофотометры, имеют большую стоимость и порой недоступны для отечественного потребителя, поэтому разработка спектрофотометрического датчика для отечественных колориметров, построенных на оптоэлектронных RGB-компонентах, может представлять интерес. В работе определена цель и поставлена задача исследования. Приведены структурная схема, система освещения с фотометрической интегрирующей сферой и внешний вид спектрофотометрического датчика. Получено спектральное распределение сигнала $I(\lambda)$ в измерительном канале при уровне 0 и при уровне 1. Проведена калибровка датчика шкалы длин волн с применением нормированных линий излучения ртутно-гелиевой лампы и синего стекла марки СС6. Получена результирующая погрешность калибровки шкалы длин волн, которая составила $\Delta\lambda = 0.5$ нм. Исследована линейность шкалы пропускания, и оценена фотометрическая погрешность при сравнении измеренных и рассчитанных значений пропускания $T(\lambda)$ для цветных нейтральных стекол. Погрешность измерений была не хуже $\Delta T \leq 0.5\%$.

Кл. сл.: спектрофотометрический датчик, шкала длин волн, коэффициент пропускания, погрешность измерений, стекла, линейная интерполяция, колориметр

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время огромный интерес представляют методы и средства измерений параметров исследуемых объектов с применением фотометрии, реализующей принцип сравнения с эталонными значениями [1, 2]. Колориметрия, являясь одним из направлений фотометрии, нашла свое применение в различных учебных и научных направлениях, таких как химия, биология, медицина, светотехника, а также в промышленности — химической, пищевой, целлюлозно-бумажной, автомобильной, оптической и т.д. [3, 4]. Современные колориметрические приборы и системы дают возможность получать параметры цвета и цветности различных образцов в интересующих колориметрических системах (XYZ, CIELAB, RGB) [5, 6].

На сегодняшний день эти приборы и системы включают в себя спектрофотометры или спектрофотометрические датчики, которые определяют спектры отражения или пропускания исследуемого твердотельного, жидкофазного или газообразного вещества в диапазоне длин волн от 380 до 760 нм [7, 8]. Используя специализированное

программное обеспечение, по полученным спектральным данным рассчитываются координаты цвета исследуемого образца или среды в необходимой системе XYZ, CIELAB или RGB [9, 10].

В зависимости от поставленных задач колориметры имеют разные геометрические размеры интегрирующих фотометрических сфер, в которых источники излучения и фотоприемные устройства или элементы располагаются либо внутри полости сферы, либо вынесены за полость сферы [11, 12]. Колориметрические приборы и системы в таком исполнении имеют высокую точность измерений, хорошую автоматизацию и защиту [13, 14].

Спектрофотометр или спектрофотометрический датчик являются частью колориметрического прибора или системы. Иностранного производства колориметры, в состав которых входят спектрофотометры, имеют большую стоимость и порой недоступны для отечественного потребителя [15].

Поэтому может представлять интерес разработка спектрофотометрического датчика для отечественных колориметров, построенных на оптоэлектронных RGB-компонентах.

Цель работы состояла в исследовании разработанного спектрофотометрического датчика для коло-

риметрических приборов, использующих оптоэлектронные RGB-компоненты.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цветовые расчеты необходимы в тех областях знаний, где цель — описание самого цвета: полиграфия, колориметрия, графика и т.д. В промышленности же главная задача применения колориметрических систем — контроль качества продукции. Определение цветового изменения — один из инструментов соблюдения требований ГОСТ и СанПиН.

Решалась задача исследовать разработанный спектрофотометрический датчик, который при перенастройке мог бы проводить измерения спектров пропускания $T(\lambda)$ и отражения $R(\lambda)$ веществ различного агрегатного состояния. Получить спектральное распределение сигнала аналого-цифрового преобразователя (АЦП) при полном экранировании и засветке. Откалибровать шкалу длин волн по нормированным линиям излучения ртутно-гелиевой лампы (ДРГС-12). Выявить результирующую погрешность калибровки шкалы длин волн. Цветными стеклами марки НС (нейтральное стекло) подтвердить линейность шкалы пропускания и оценить фотометрическую погрешность.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

В экспериментальной практике до сих пор используются отечественные спектрофотометры, построенные по схеме с изменением угла плоской дифракционной решетки (СФ-26, СФ-46). Спектрофотометры нового поколения российского производства (СФ-56, СФ-2000), а также иностранные аналоги (Unico 2800, WTW Photolab 7100 VIS, Merck Spectroquant Prove 100 VIS), имея высокую стоимость, для российского потребителя порой бывают недоступными для исследований. А значит, необходимо создать такой спектрофотометрический датчик, который мог бы соответствовать зарубежным аналогам и определять спектральные параметры с высокой точностью для колориметрических приборов, построенных на оптоэлектронных RGB-компонентах.

На рис. 1, 2 представлены структурная схема спектрофотометрического датчика и подключаемая система освещения (осветитель) с фотометрической интегрирующей сферой. В данной работе датчик был доработан, что позволило расширить область применения (обеспечена возможность менять осветители).

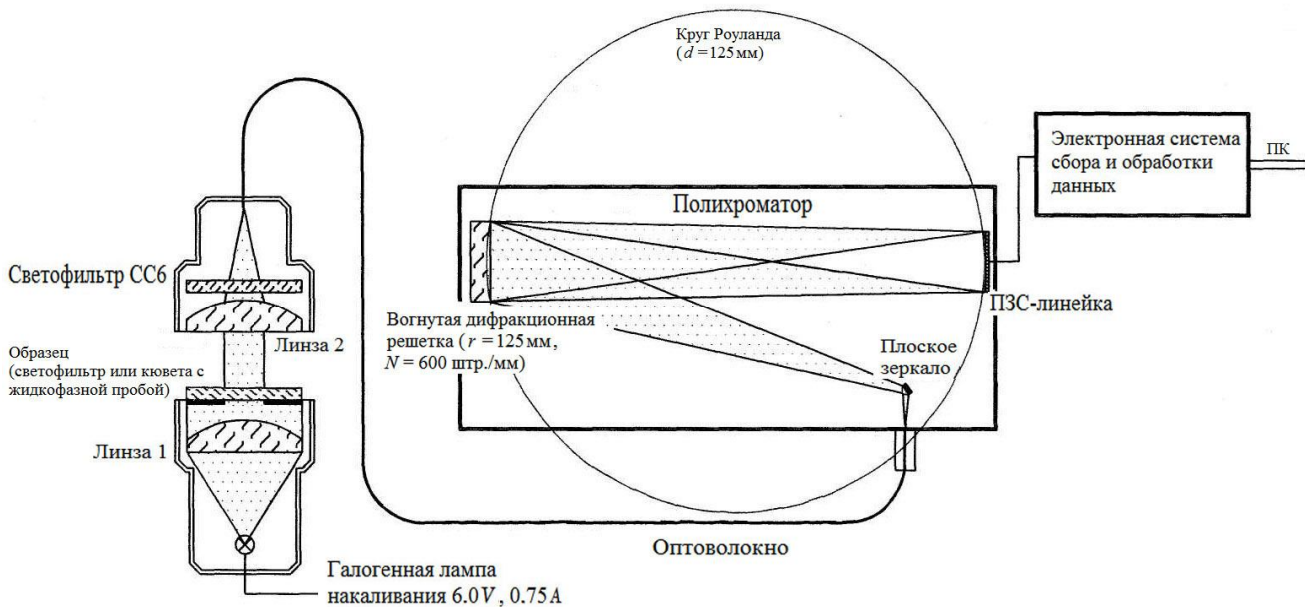


Рис. 1. Структурная схема спектрофотометрического датчика с подключенным рабочим осветителем

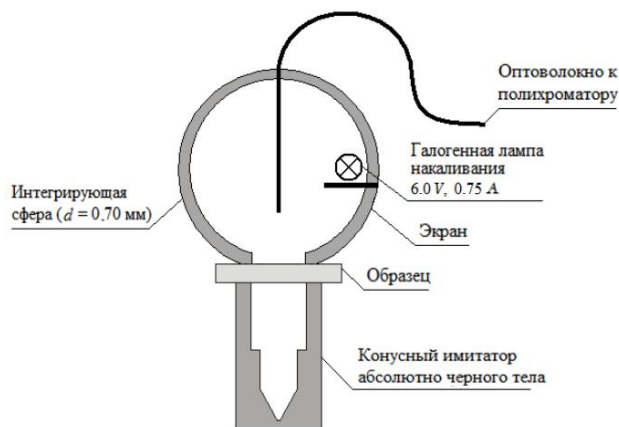


Рис. 2. Схема осветительной системы (осветителя) с фотометрической интегрирующей сферой

В измененном спектрофотометрическом датчике появилась возможность проводить измерения коэффициента пропускания $T(\lambda)$ прозрачных или рассеивающих образцов с индикатрисой рассеивания 135° , а также измерять спектры диффузного отражения твердотельных объектов (интегрирующая фотометрическая сфера с внутренним экраном). Оба осветителя используют одно и то же оптическое волокно для подключения к полихроматору. А это означает, что дополнительной настройки датчика при замене одного осветителя на другой не требуется.



Рис. 3. Внешний вид спектрофотометрического датчика

На рис. 3 приведен внешний вид спектрофотометрического датчика. В отличие от существующих, в данном датчике выходной торец оптического волоконного жгута имеет диаметр 0.1 мм [14, 15]. Изменена фотоприемная часть, где линейный размер составил 11.5 мм, что позволило использовать ПЗС-линейку российского производителя. В датчике используется в качестве источника излучения галогенная лампа накаливания.

Этим датчиком возможно проводить исследования прозрачных, высокополированных, а также рассеивающих объектов с индикатрисой рассеивания в пределах угла 135° . Датчик работает в диапазоне длин волн от 380 нм до 760 нм с шагом длины волны 2 нм. В состав датчика включен оптический светофильтр СС6 (синее стекло) для устранения длинноволновой составляющей светового потока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектральное распределение сигнала $I(\lambda)$ в измерительном канале при уровне 0 (полное экранирование) и при уровне 1 (полная засветка) показано на рис. 4. Из рисунка видно, что во всем измеряемом диапазоне длин волн разница этих уровней не хуже 0.05 отн. ед. При полной засветке наблюдается периодичность сигнала, вызванная интерференцией на входе ПЗС-линейки.

Для калибровки шкалы длин волн использовались нормированные линии излучения ртутно-гелиевой лампы ДРГС-12. С применением СС6 толщиной 2.4 мм был получен спектр излучения.

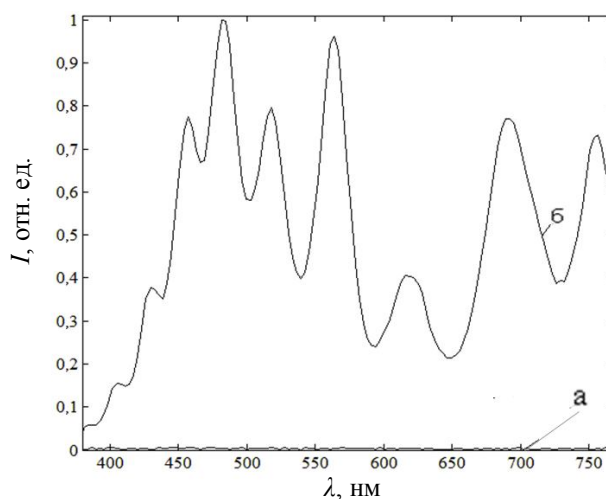


Рис. 4. Графическое представление сигнала в канале измерений.
а — при экранировании; б — при засветке

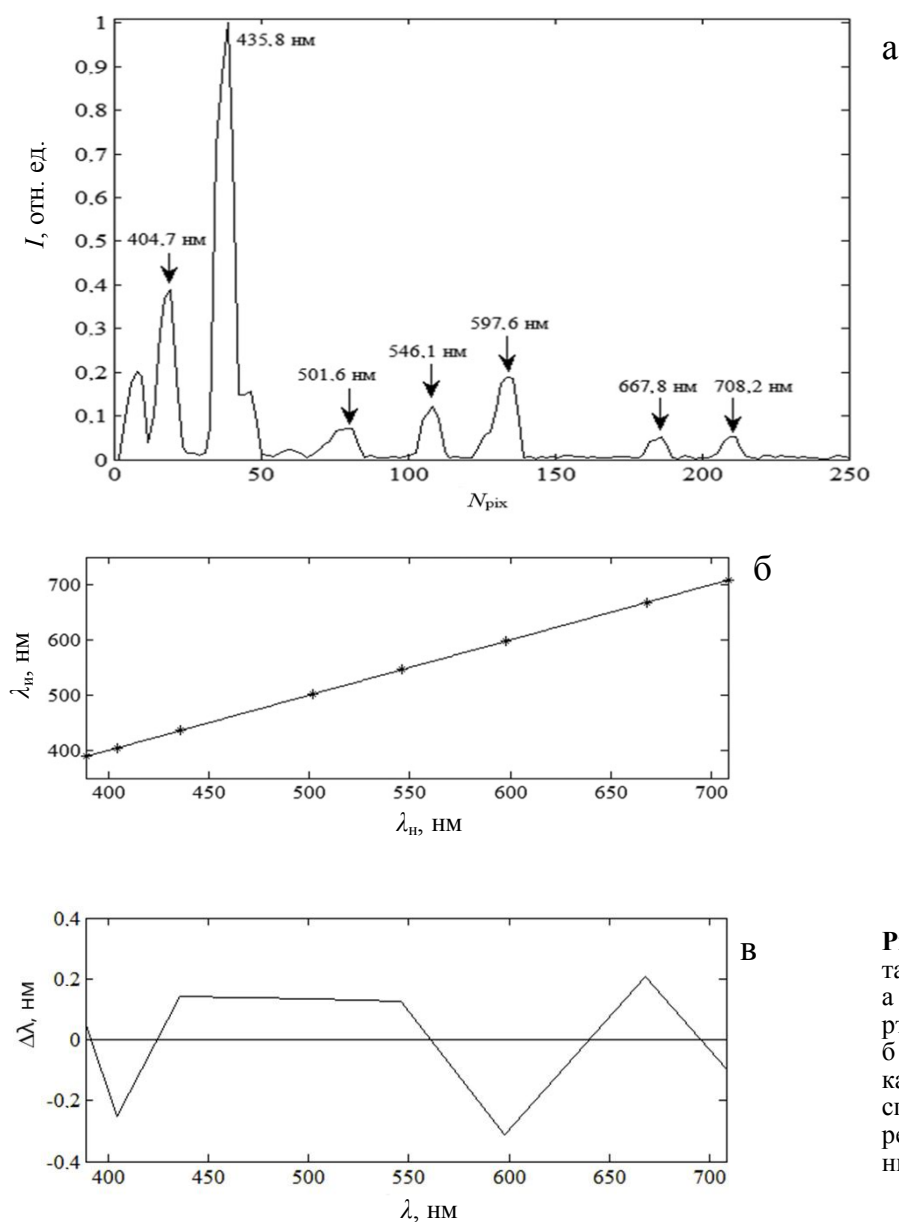


Рис. 5. Экспериментальные результаты.

а — спектральное распределение ртутно-гелиевой лампы ДРГС-12; б — калибровочная характеристика; в — погрешность калибровки спектрофотометра. Точки — измеренные значения, сплошная линия — расчет

На рис. 5, а, стрелки обозначают нормативные линии излучения для калибровки спектрофотометрического датчика. N_{pix} — номер элемента ПЗС-линейки. На рис. 5, б, показана калибровочная зависимость $\lambda_{\text{и}} = f(\lambda_{\text{н}})$, где $\lambda_{\text{и}}$ — измеренное спектральное положение линии, а $\lambda_{\text{н}}$ — нормативное спектральное положение линии. В исследуемой области спектра 380–760 нм зависимость $\lambda_{\text{и}} = f(\lambda_{\text{н}})$ может быть интерполирована следующим выражением: $\lambda_{\text{и}} = 1.001 \lambda_{\text{н}} - 0.20609$. На рис. 5, в, дана зависимость $\Delta\lambda = f(\lambda)$, которая показывает результирующую погрешность калибровки шкалы длин волн. В эксперименте она составила $\Delta\lambda = 0.5$ нм. Спектр "желтого" дуплета ртути ($\lambda =$

$= 577$ нм и $\lambda = 579$ нм) использовался для определения предела спектрального разрешения, который не превышал 3 нм, что удовлетворяет требованиям производственного контроля (использованию датчика в видимой области спектра).

Для исследования линейности шкалы пропускания и оценки фотометрической погрешности сравнивались измеренные и рассчитанные значения пропускания $T(\lambda)$ для цветных нейтральных стекол (НС) (рис. 6, а). На рис. 6, б, показана зависимость $T_{\text{и}} = f(T_{\text{н}})$, которая практически линейна. Измеренные $T_{\text{и}}$ и рассчитанные $T_{\text{н}}$ коэффициенты пропускания были получены при $\lambda = 450$ нм, $\lambda = 550$ нм и $\lambda = 650$ нм.

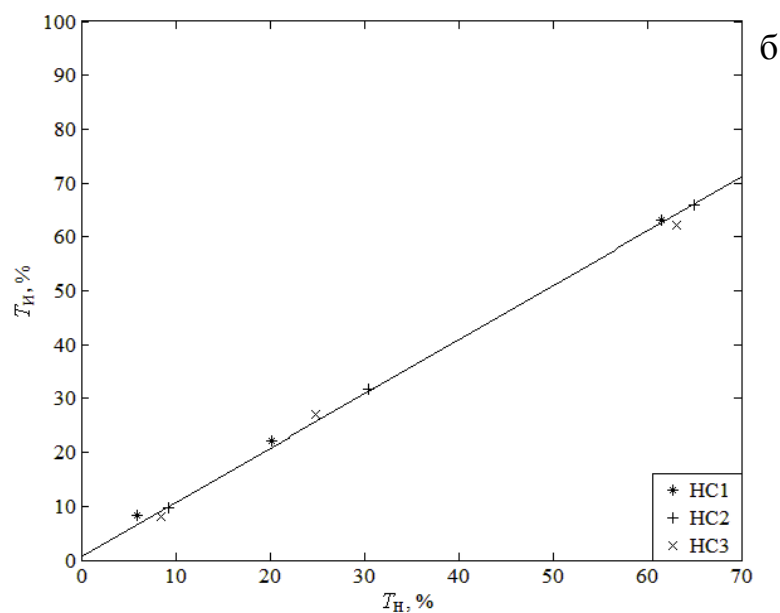
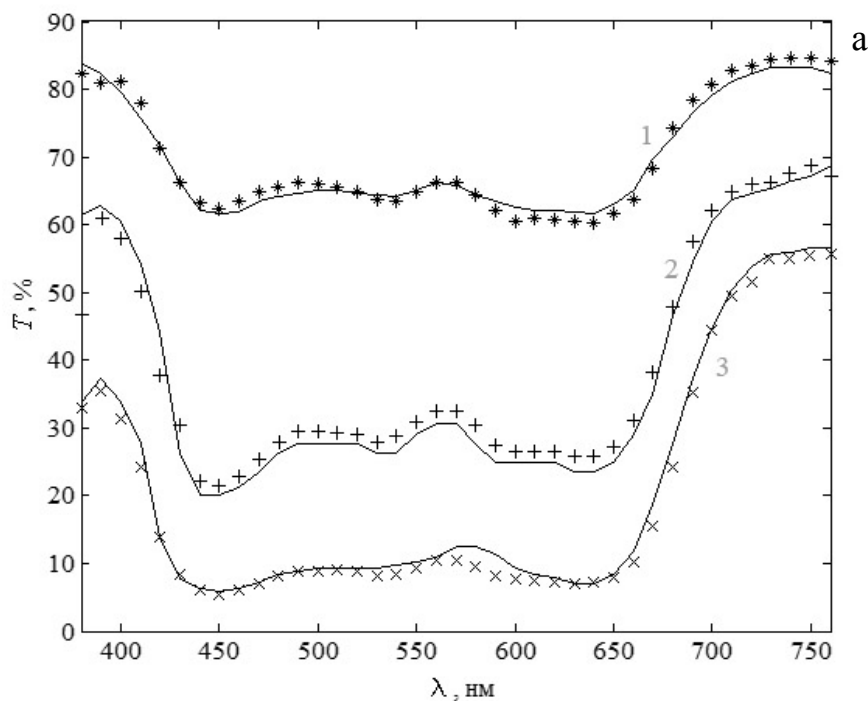


Рис. 6. Эксперимент.

а — спектры пропускания цветных нейтральных стекол: 1 — НС1, 2 — НС2, 3 — НС3. Точки — измеренные значения, сплошная линия — расчет;
б — сходимость рассчитанных T_n и измеренных T_i коэффициентов пропускания. Точки — измеренные значения, сплошная линия — расчет

Сходимость линейной интерполяции можно представить следующей формулой:

$$T_i = 1.0071 \cdot T_n + 0.55217.$$

Погрешность измерений $\Delta T = (T_n - T_i) \leq 0.5\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследован спектрофотометрический датчик для колориметров, в состав которых входят оптоэлектронные RGB-компоненты. Получено спектральное распределение сигнала в измерительном канале при засветке и экранировании.

Датчик был откалиброван по нормированным линиям излучения ДРГС-12 с применением светофильтра СС6. В области спектра 380–760 нм определена погрешность калибровки шкалы длин волн. Получен предел спектрального разрешения по спектру "желтого" дуплета ртути. В работе использовались цветные стекла серии НС для подтверждения линейности шкалы пропускания. Экспериментальные результаты могут представлять интерес для оптического приборостроения, в частности для создания колориметров, построенных на оптоэлектронных RGB-компонентах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юстова Е.Н. Цветовые измерения (Колориметрия). СПб.: Издательство СПбГУ, 2000. 397 с.
2. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
3. Tardy H.L. Matrix method for integrating-sphere calculations // Journal of the Optical Society of America A. 1991. Vol. 8, no. 9. P. 1411–1418. DOI: 10.1364/JOSAA.8.001411
4. Clare J.F. Comparison of four analytic methods for the calculation of irradiance in integrating spheres // Journal of the Optical Society of America A. 1998. Vol. 15, no. 12. P. 3086–3096. DOI: 10.1364/JOSAA.15.003086
5. Pickering J.W., Prahl S.A., van Wieringen N., Beek J.F., Sterenborg H.J.C.M., van Gemert M.J.C.. A double integrating sphere system for measuring the optical properties of tissue // Applied Optics. 1993. Vol. 32, iss. 4. P. 399–410. DOI: 10.1364/AO.32.000399
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 // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 4. С. 373–379.
7. 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
8. Колесниченко С.В., Константинова А.А., Машек А.Ч., Майоров Е.Е., Писарева Е.А., Цыганкова Г.А. Фотометрия автомобильных моторных масел // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 6. С. 83–88.
9. Цыганкова Г.А., Майоров Е.Е., Колесниченко С.В., Константинова А.А., Машек А.Ч., Писарева Е.А. Экспериментальное исследование разработанной спектроколориметрической системы для изучения оптических свойств жидкофазных сред пищевой промышленности // Приборы. 2022. № 3 (261). С. 22–28. URL: <http://www.pribory-smi.ru/>
10. 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. URL: <http://pribor.tgizd.ru/ru/arhiv/16076>
11. 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 двухполосной оптоэлектронной интегрирующей сферой для контроля диффузно отражающих объектов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. 2017. Вып. 48, № 20 (269). С. 107–115.
12. 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. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32298075>
13. 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
14. Майоров Е.Е. Применение колориметрических систем для контроля качества бумажной продукции // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Третья Всероссийская научная конференция (СПб., 18-22 апреля 2022 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2022. С. 56–58.
15. Майоров Е.Е. Измерение оптических параметров по красочного слоя колориметрическим прибором // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 413–419. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-413-419

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), Санкт-Петербург (Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Пушкина В.П.)

Военно-морской политехнический институт (ВУНЦ) ВМФ ВМА, г. Пушкин (Цыганкова Г.А.)

Контакты: Майоров Евгений Евгеньевич, majorov_ee@mail.ru

Материал поступил в редакцию 15.07.2023

INVESTIGATION OF THE DEVELOPED SPECTROPHOTOMETRIC SENSOR FOR COLORIMETRIC DEVICES USING OPTOELECTRONIC RGB COMPONENTS

E. E. Maiorov¹, A. V. Arefiev¹, R. B. Guliyev¹, V. P. Pushkina¹, G. A. Tsygankova²

¹*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP), Saint-Petersburg, Russia*

²*Naval Polytechnic Institute of the VUNC Navy VMA, Pushkin, Russia*

The study highlights the development of a spectrophotometric sensor for colorimetric devices using optoelectronic RGB components. Foreign colorimeters, which include spectrophotometers, have a high cost and are sometimes inaccessible to a domestic consumer, therefore, the development of a spectrophotometric sensor for domestic colorimeters built on optoelectronic RGB components may draw interest. The work defines the goal and sets the task of the study. A block diagram, a lighting system with a photometric integrating sphere, and the appearance of a spectrophotometric sensor are presented. The spectral distribution of the signal $I(\lambda)$ in the measuring channel at level "0" and at level "1" is obtained. The wavelength scale sensor was calibrated using normalized emission lines from a mercury-helium lamp and blue glass of the SS6 make. The resulting error $\Delta\lambda = 0.5$ nm of calibration of the wavelength scale was obtained. The linearity of the transmission scale was investigated, and the photometric error was estimated in terms of comparing the measured and calculated transmission values $T(\lambda)$ for colored neutral glasses. The measurement error was no worse than $\Delta T \leq 0.5\%$.

Keywords: spectrophotometric sensor, wavelength scale, transmittance, measurement error, glasses, linear interpolation, colorimeter

REFERENCES

1. Yustova E.N. *Tsvetovye izmereniya (Kolorimetriya)* [Color measurements (Colorimetry)]. Saint Petersburg, SPbGU Publ., 2000. 397 p. (In Russ.).
2. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 264 p. (In Russ.).
3. Tardy H.L. Matrix method for integrating-sphere calculations. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, vol. 8, no. 9, pp. 1411–1418. DOI: 10.1364/JOSAA.8.001411
4. Clare J.F. Comparison of four analytic methods for the calculation of irradiance in integrating spheres. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, vol. 15, no. 12, pp. 3086–3096. DOI: 10.1364/JOSAA.15.003086
5. Pickering J.W., Prahl S.A., van Wieringen N., Beek J.F., Sterenborg H.J.C.M., van Gemert M.J.C. A double integrating sphere system for measuring the optical properties of tissue. *Applied Optics*, 1993, vol. 32, no. 4, pp. 399–410. DOI: 10.1364/AO.32.000399
6. Prokopenko V.T., Maiorov E.E., Shalamay L.I., Popova N.E., Chernyak T.A., Kurlov A.V., Dagaev A.V., Tsygankova G.A. [In vivo study of human tooth enamel using colorimetric device]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2019, vol. 62, no. 4, pp. 373–379. (In Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-372-378
7. Arefiev A.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V., Maiorov E.E., Pisareva E.A., Khokhlova M.V. [Experimental study of the developed colorimetric sensor for measuring the color of glass]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and applied problems of engineering and technology], 2021, no. 1 (345), pp. 131–137. (In Russ.). DOI: 10.33979/2073-7408-2021-345-1-131-137
8. Kolesnichenko S.V., Konstantinova A.A., Mashek A.C., Maiorov E.E., Pisareva E.A., Tsygankova T.A. [Photometry of automotive motor oils]. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the TSU. Technical science], 2021, no. 6, pp. 83–88. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-83-88 (In Russ.).
9. Tsygankova G.A., Maiorov E.E., Kolesnichenko S.V., Konstantinova A.A., Mashek A.C., Pisareva E.A. [Experimental study of the developed spectrophotometric system for studying the optical properties of liquid-phase media of the food industry]. *Pribory* [Instruments], 2022, no. 3 (261), pp. 22–28. URL: <http://www.pribory-smi.ru/> (In Russ.).
10. Maiorov E.E., Chernyak T.A., Dagaev A.V., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Khokhlova M.V., Kurlov A.V., Fadeev A.O. [The ability to use the colorimeter with the RGB components for research photooptical bleaching, toning and dyeing the paper]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2017, no. 3, pp. 22–29. URL: <http://pribor.tgizd.ru/ru/arhiv/16076> (In Russ.).
11. Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Abramyan V.K., Zaitsev Yu.E., Khaidarov A.G., Khaidarov G.G. [Development of a colorimetric sensor with an RGB element and a two-band optoelectronic in-tagging sphere for the control of diffusely penetrating objects]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta*

- [Scientific statements of Belgorod State University], 2017, vol. 48, no. 20 (269), pp. 107–115. (In Russ.).
12. Maiorov E.E., Shalamay L.I., Turovskaya M.S., Litvinenko A.N., Chernyak T.A., Pushkina V.P., Dagaev A.V., Ponomarev S.E. [The application of the developed colorimetric device for measuring the geometric parameters of the color dental bleach and its feasibility study]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2018, no. 1, pp. 54–59. (In Russ.).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32298075>
 13. Maiorov E.E., Shalamay L.I., Dagaev A.V., Ushakova A.S., Guliev R.B., Khokhlova M.V., Tsygankova G.A., Pisareva E.A. [Study of the spectra of diffuse reflection samples of white paper automated RGB colorimeter]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2019, no. 12, pp. 27–35. (In Russ.).
DOI: 10.25791/pribor.12.2019.1062
 14. Maiorov E.E. [Application of colorimetric systems for quality control of paper products]. *Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem: Tret'ya Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya (Saint Petersburg, 18–22 Apr 2022)*. [Proc. of the III All-Russian science conferences "Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem"]. Saint Petersburg, SUAI Publ., 2022. pp. 56–58. (In Russ.).
 15. Maiorov E.E. [Measuring the paint layer optical parameters with a colorimetric instrument]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2022, vol. 65, no. 6, pp. 413–419. (In Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-413-419

Contacts: *Maiorov Evgeniy Evgen'evich*,
majorov_ee@mail.ru

Article received by the editorial office on 15.07.2023

INTRODUCTION

At present, methods and means of measuring the parameters of objects using photometry, which implements the principle of comparison with reference values [1, 2], are of great interest. Colorimetry, belonging to photometry, has found its application in various educational and scientific areas, such as chemistry, biology, medicine, lighting engineering, as well as in industry—chemical, food, pulp and paper, automotive, optical, etc. [3, 4]. Modern colorimetric devices and systems make it possible to obtain parameters of color and chromaticity of various samples in the colorimetric systems of interest (XYZ, CIELAB, RGB) [5, 6].

To date, these devices and systems include spectrophotometers or spectrophotometric sensors that determine the reflection or transmission spectra of the investigated solid, liquid phase, or gaseous substance in the wavelength range from 380 to 760 nm [7, 8]. Using specialized software, according to the obtained spectral data, the color coordinates of the sample or medium under study are calculated in the required XYZ, CIELAB or RGB system [9, 10].

Depending on the tasks set, colorimeters have different geometric dimensions for integrating photometric spheres, in which emission sources and photodetectors or elements are located either inside or outside the sphere cavity [11, 12]. Colorimetric devices and

systems in this design have high measurement accuracy, good automation, and protection [13, 14].

A spectrophotometer or spectrophotometric sensor is part of a colorimetric instrument or system. Foreign-made colorimeters, which include spectrophotometers, are expensive and sometimes inaccessible to domestic consumers [15].

Therefore, it may be of interest to develop a spectrophotometric sensor for domestic colorimeters based on optoelectronic RGB components.

The purpose of the work was to study the developed spectrophotometric sensor for colorimetric devices using optoelectronic RGB components.

FORMULATION OF THE PROBLEM

Color calculations are necessary in those areas of knowledge where the goal is to describe the color itself: printing, colorimetry, graphics, etc. In industry, the main task of colorimetric systems is to control the quality of products. The determination of color change is one of the tools for complying with the requirements of GOSTs and SanPiNs (national standards in Russia).

The problem was solved by investigating the developed spectrophotometric sensor, which, when reconfigured, could measure the spectra of transmission $T(\lambda)$ and reflection $R(\lambda)$ of substances of various aggregate states. Get the spectral distribution of the ana-

log-to-digital converter (ADC) signal with full shielding and illumination. Calibrate the wavelength scale according to the normalized emission lines of a mercury-helium lamp (ДРГС-12). Find the resulting error in the calibration of the wavelength scale. Use colored glasses of the HC type (neutral glass) to confirm the linearity of the transmission scale and evaluate the photometric error.

RESEARCH OF THE DEVELOPED SPECTROPHOTOMETRIC SENSOR

In experimental practice, domestic spectrophotometers are still used, built according to a scheme with a change in the angle of a flat diffraction grating (СФ-26, СФ-46). Spectrophotometers of a new generation of Russian production (СФ-56, СФ-2000), as well as foreign analogues (Unico 2800, WTW Photolab 7100 VIS, Merck Spectroquant Prove 100 VIS), have a high cost, and sometimes are inaccessible for the Russian consumer for usage in research.

This means that it is necessary to create a spectrophotometric sensor that could correspond to foreign analogues and determine the spectral parameters with high accuracy for colorimetric devices built on optoelectronic RGB components.

Figs. 1 and 2 show a spectrophotometric sensor layout and a connected lighting system (illuminator) with a photometric integrating sphere. In this work, the sensor was improved, which made it possible to expand the scope (change of illuminators was enabled).

Fig. 1. Structural diagram of a spectrophotometric sensor with a connected working light

Fig. 2. Layout of the lighting system (illuminator) with a photometric integrating sphere

In the modified spectrophotometric sensor, it became possible to measure the transmittance $T(\lambda)$ of transparent or scattering samples with a scattering indicatrix of 135° , as well as the diffuse reflectance spectra of solid objects (an integrating photometric sphere with an internal screen). Both illuminators use the same optical fiber to connect to the polychromator. And this means that additional adjustment of the sensor when replacing one illuminator with another is not required.

Fig. 3 shows the appearance of the spectrophotometric sensor. Unlike the existing ones, the output end of the optical fiber bundle in this sensor has a diameter of 0.1 mm [14, 15]. The photodetector was

changed, and the linear size became 11.5 mm, which made it possible to use a CCD array from a Russian manufacturer. The sensor uses a halogen incandescent lamp as an emission source.

Fig. 3. Appearance of the spectrophotometric sensor

Using this sensor, it is possible to study transparent, highly polished, and scattering objects with a scattering indicatrix within an angle of 135° . The sensor operates in the wavelength range of 380 nm to 760 nm with a wavelength step of 2 nm. The sensor includes an optical light filter CC6 (blue glass) to eliminate the long-wave component of the light flux.

EXPERIMENTAL RESULTS

The spectral distribution of the signal $I(\lambda)$ in the measuring channel at level 0 (total screening) and at level 1 (total illumination) is shown in Fig. 4. It can be seen from the figure that, in the entire measured wavelength range, the difference between these levels is no worse than 0.05 rel. units. With full illumination, a periodicity of the signal is observed, caused by interference at the input of the CCD array.

Fig. 4. Graphical representation of the signal in the measurement channel.
a — when shielding; б — under illumination

To calibrate the wavelength scale, normalized emission lines from a ДРГС-12 mercury-helium lamp were used. Using CC6 with a thickness of 2.4 mm, an emission spectrum was obtained.

In Fig. 5, a, the arrows indicate the normative emission lines for calibrating the spectrophotometric sensor. N_{pix} is the number of the CCD array element. Fig. 5, б, shows the calibration dependence $\lambda_n = f(\lambda_n)$, where λ_n is the measured spectral position of the line and λ_n is the normative spectral position of the line. In the investigated region of the spectrum 380–760 nm, the dependence $\lambda_n = f(\lambda_n)$ can be interpolated using the following expression: $\lambda_n = 1.001 \lambda_n - 0.20609$.

Fig. 5. Experimental results.
a — spectral distribution of a ДРГС-12 mercury-helium lamp; б — calibration characteristic; в — spectrophotometer calibration error.
Dots — measured values, solid line — calculation

In Fig. 5, в, the dependence $\Delta\lambda = f(\lambda)$ is given, which shows the resulting error in the calibration of the wavelength scale. In the experiment, it was $\Delta\lambda =$

= 0.5 nm. The spectrum of the "yellow" doublet of mercury ($\lambda = 577$ nm and $\lambda = 579$ nm) was used to determine the spectral resolution limit, which did not exceed 3 nm, which satisfies the requirements of production control (use of a sensor in the visible spectrum).

To study the linearity of the transmission scale and estimate the photometric error, the measured and calculated transmission values $T(\lambda)$ for colored neutral glasses (NG) were compared (Fig. 6, a). Fig. 6, б, shows the dependence $T_{и} = f(T_{н})$, which is practically linear. The measured $T_{и}$ and calculated $T_{н}$ transmittances were obtained at $\lambda = 450, 550, 650$ nm.

Fig. 6. Experiment.

a — transmission spectra of colored neutral glasses: 1 — NG1, 2 — NG2, 3 — NG3. Dots are measured values, solid line is calculation.

б — convergence of calculated $T_{н}$ and measured $T_{и}$ transmittances. Points are measured values, solid line is calculation

The convergence of linear interpolation can be represented by the following formula:

$$T_{и} = 1.0071 \cdot T_{н} + 0.55217.$$

$$\text{Measurement error } \Delta T = (T_{н} - T_{и}) \leq 0.5\%.$$

CONCLUSION

In this work, a spectrophotometric sensor for colorimeters, which include optoelectronic RGB components, was studied. The spectral distribution of the signal in the measuring channel under illumination and shielding is obtained. The sensor was calibrated according to the normalized ДРГС-12 emission lines using a CC6 light filter. In the spectral region of 380–760 nm, the calibration error of the wavelength scale was determined. The spectral resolution limit was obtained for the spectrum of the "yellow" doublet of mercury. In the work, colored glasses of the NG series were used to confirm the linearity of the transmission scale. The experimental results may be of interest for optical instrumentation, in particular, for the creation of colorimeters based on optoelectronic RGB components.