

Биомедицинские приборы и системы

УДК 681.785.6

В.О. Бушинский, канд. техн. наук, С.А. Воронов, д-р техн. наук, В.Й. Панкратов, В.Н. Родионов, канд. физ.-мат. наук

Оценка погрешностей измерений спектроколориметра с интерференционными светофильтрами

Проведены анализ и оценка погрешностей измерений спектроколориметра с интерференционными светофильтрами. Показано, что основной вклад в ошибку измерений вносит систематическая составляющая, обусловленная погрешностью используемых эталонных образцов. Для приборов с источником типа А погрешность не превышает 1,2 %, при работе с источником Д65 она находится в пределах ± 2 %. По сравнению с аналогичными приборами с дифракционной решеткой, спектроколориметры с интерференционными фильтрами не уступают им по точности измерений, однако, значительно дешевле (в три-четыре раза) и проще в использовании.

The analysis and error estimate of measurements of spektrocolorimeter with interference filters is made. It is shown that basic contribution to the error of measurements is brought about by systematic one that it is cause of the error of the used standards. For devices with a source А an error does not exceed 1,2 %, during work with the source Д65 it is in limits of $\pm 2\%$. As compared to similar devices with a diffraction grate, spektrocolorimeter with interference filters does not yield to them on exactness of measurements, however, considerably cheaper (in three-four times) and it is simpler in the use.

Ключевые слова: спектроколориметр с интерференционными фильтрами, фотометрические измерения, погрешности измерений, случайные и систематические ошибки, оценка погрешностей измерений, источники излучения, фотоприемники.

Введение

Современные технологии в целлюлозно-бумажной, полиграфической и других отраслях промышленности позволяют создавать широкий ассортимент продукции высокого качества и требуют постоянного повышения точности методов и средств измерений. Это вызывает необходимость разработки и внедрения новых

международных стандартов, определяющих более высокие требования к точности измерения белизны и цветовых характеристик материалов методами и средствами спектроколориметрии [1–6]. Наряду с спектроколориметрами (СК) с дифракционной решеткой, о возможностях которых можно судить по работам [7, 8], широкое применение для технологического контроля производственных процессов благодаря своей дешевизне и простоте в эксплуатации находят СК, в которых в качестве диспергирующих элементов применяют интерференционные фильтры (ИФ). В частности, это фотометры сканирующие «СКФ» и фотометр отражения «ФО-1», выпускаемые Загорским оптико-механическим заводом, а также фотометр «Колир», разработанный НПП «Тригла» совместно с НТУУ «КПИ» [9]. Указанные приборы внесены в госреестр средств измерений Украины, России и республики Беларусь. Поэтому становится актуальным анализ и оценка погрешностей основных функциональных частей такого СК для возможностей его использования в соответствии с требованиями новых нормативных документов.

Целью этой работы является оценка погрешностей основных функциональных частей спектроколориметра с интерференционными фильтрами и сравнение его характеристик с зарубежными приборами аналогичного типа.

1. Методика измерений

Измерения проводились на базе спектроколориметра «Колир». Выделение узких участков спектра отражения образца проводится с помощью ИФ, размещенных на диске, который вращается при помощи шагового двигателя; участки спектра последовательно меняются. Таким образом, проводится сканирование спектра.

Фотометрическая погрешность СК определяется следующими факторами: нестабильностью параметров источников излучения в процессе измерения; аппаратными искажениями прибора; влиянием колебаний температуры окружающей среды; временным дрейфом изме-

рительного тракта; изменением параметров эталонов в процессе их эксплуатации; отклонениями в устройстве освещения (наблюдения) и др.

Обязательным требованием к СК, является наличие трех стандартных источников излучения – А, С и Д65 [10].

Спектральное распределение энергии излучения стандартного источника А получают с помощью лампы накаливания с коррелированной цветовой температурой вольфрамовой нити 2856 К; стандартного источника излучения С – с коррелированной цветовой температурой около 6770 К. Отличительной особенностью источника Д65 является наличие в спектре значительно большей доли ультрафиолетового (УФ) излучения по сравнению с источником А за счет дополнительного источника. При этом соотношение излучения в видимой и УФ части спектра строго задано.

Создание потоков излучения с заданными параметрами, выполнение условий освещения и наблюдения контролируемой поверхности, а также обработка сигналов происходит с определенными ошибками, которые приводят к общей фотометрической погрешности прибора.

Погрешности измерения, связанные с источниками, в основном, обусловлены несоответствием их спектра излучения требованиям стандарта из-за колебаний мощности излучения источника в процессе измерения или его недостаточным разогревом на начальной стадии работы. Эти погрешности значительно уменьшены за счет применения двухканальной схемы измерения.

Перед проведением измерений СК откалиброван по эталону, изготовленному на основе сульфата бария и аттестованному на образцовой установке Всероссийского института оптико-физических измерений (ВНИИОФИ). В качестве рабочего эталона белизны использовалось белое стекло марки МС-20 с аттестованным значением белизны $93,20 \pm 0,3 \%$, которое имеет нейтральную поверхность, т.е. значения коэффициентов отражения приблизительно одинаковы во всем видимом спектральном диапазоне.

2. Определение погрешностей функциональных частей спектроколориметра

2.1. Погрешности, связанные с изменением параметров источников А и Д65

Для определения влияния нестабильности источников излучения на погрешность измере-

ния белизны образца проводилось изменение освещенности образца и внутренней поверхности шара: ее увеличение на 20 % и уменьшение на 30 % от начального значения освещенности, создаваемой источником А; а затем эта погрешность приводилась (в приближении пропорциональности) к реальным колебаниям мощности излучения источников, составляющим 1 %. Указанный диапазон изменения определялся конструктивными возможностями прибора и достигался диафрагмированием источника излучения.

По результатам измерений сигналов, соответствующих яркости в измерительном и опорном каналах при измерении освещенности образца, рассчитывались коэффициенты отражения во всем спектральном диапазоне и вычислено среднее арифметическое значение белизны образца, равное 93,20 % и определена абсолютная погрешность, которая составила 0,05 % при изменении мощности источника излучения А на 1 %.

Аналогичные измерения и вычисления проведены при изменении мощности источника УФ излучения в пределах $\pm 1 \%$, (с 35,7 % на 36,7 %, затем с 35,7 % на 34,7 % относительно источника А), которые являются реальными колебаниями его мощности.

По результатам измерений рассчитано среднее арифметическое значение белизны образца с оптическим отбеливателем, равное 109,45 % и отклонение результатов измерения от среднего, которое составляет $\pm 0,5 \%$. Колебания мощности излучения источника А в составе Д65 на $\pm 1 \%$ приводит дополнительной погрешностью определения белизны равной $\pm 0,2 \%$.

2.2. Погрешности, связанные с интерференционными фильтрами

Аппаратные искажения, которые вносит прибор с ИС, связаны, в основном, с отклонением параметров фильтров от нормативных значений для соответствующей длины волны. Последнее обусловлено степенью чистоты материала, используемого для нанесения интерференционных пленок, а также качеством технологии их нанесения.

Для экспериментального определения аппаратных искажений СК использовались образцы (эталон) с известными значениями спектральных коэффициентов отражения на длинах волн с интервалом 10 нм, которые были аттестованы в ВНИИОФИ. Для калибровки СК измерены спектральные характеристики одного из

этих эталонов с значением белизны 97,6 % (№19-01-90). Затем вычислены поправки для определения истинной спектральной характеристики, которые в дальнейшем были учтены в программном обеспечении прибора. Это позволило обеспечить отклонение измеренной спектральной характеристики материала от реальной на величину не более 0,15 % по всему спектральному диапазону.

Спектральная зависимость коэффициентов отражения другого эталона белизны (№ОКП2) представлена в табл.1 и произведено сравнение с данными аттестации этого образца в ВНИИОФИ. Значение его белизны составляет 96,10 %.

Аналогичные испытания, проведенные на эталонах с другими значениями коэффициентов

Таблица 1. Сравнение спектральной характеристики эталона №ОКП2, измеренной спектроколориметром «Колир» с аттестованной в ВНИИОФ

Длина волны, нм	Коэффициент отражения, %, эталон №ОКП2		Отклонение коэффициента отражения, %
	Установка ВНИИОФИ	СК «Колир»	
400	95,34	95,20	-0,14
420	95,68	95,61	-0,07
440	95,93	95,91	-0,02
460	96,24	96,17	-0,07
480	96,32	96,23	-0,09
500	96,12	96,03	-0,09
520	96,28	96,17	-0,11
540	96,25	96,25	0,00
560	96,17	96,13	-0,04
580	96,21	96,08	-0,13
600	95,92	95,90	-0,02
620	96,07	95,98	-0,09
640	95,91	95,76	-0,15
660	96,05	95,96	-0,09
680	95,99	95,92	-0,07
700	95,9	95,92	+0,02
720	95,76	95,86	+0,10
740	96,05	96,05	+0,00

2.3. Погрешности, вызываемые колебаниями температуры и временным дрейфом измерительного тракта

Основное влияние колебания температуры окружающей среды оказывают на спектральную характеристику используемых в СК фотоприемников серии S1337-66BR фирмы Hamamatsu. Двухканальная схема измерения может компенсировать это влияние, если в опорном и из-

отражения и белизны, показали, что средне-квадратичное отклонение значений белизны от эталона не превышает 0,1 % с учетом округления.

Динамическая погрешность измерения, возникающая при сканировании спектра, обычно исключается выбором скорости вращения диска со светофильтрами. При использовании шаговых двигателей эта погрешность очень мала, поскольку измерение проводится при остановленном электродвигателе после его поворота на заданный угол. При этом его электромагнитная система жестко фиксирует диск со светофильтрами в заданной точке с погрешностью не более 0,02 мм.

мерительном каналах стоят фотоприемники с идентичными температурными зависимостями спектральных характеристик. Однако, поскольку они могут различаться, то результаты измерений оказываются чувствительными к температуре.

Измерения, проведенные на пяти СК одного типа, показали, что изменение температуры от 20 до 40°C приводит к абсолютной погрешности измерения белизны, не превышающей 0,3 %.

Указанную систематическую погрешность можно исключить, проведя калибровку прибора через 0,5 часа после включения.

Как показали опытные данные, временной дрейф на протяжении 8 часов измерений белизны составляет не более 0,05 %. Дрейф усилительного тракта устраняется путем использования аналого-частотного преобразования сигнала на базе микросхемы типа IVC-102.

2.4 Погрешности, вызываемые отклонениями параметров эталонов, а также устройства освещения/наблюдения

Согласно стандарту ISO 2469-77 [11], приборы, предназначенные для рабочих измерений, должны быть откалиброваны, по отношению к образцовым, с помощью эталонов. Абсолютная погрешность измерения коэффициентов отражения и белизны на образцовой установке ВНИИОФИ составляет не более 0,3 % (согласно свидетельствам о поверке эталонных образцов) при источнике А и не более 0,5 % при источнике Д65. Для исключения дополнительной погрешности, связанной со свойствами материала, из которого изготовлен эталонный образец, в ISO 2469 (п. 3.2) установлены требования к материалу эталонного образца. В качестве эталонов могут использоваться свежеприготовленные таблетки сульфата бария или матовое молочное стекло.

Измерения, проведенные на образце из молочного стекла МС-20, обладающего повышенной непрозрачностью показали, что среднеквадратичное отклонение не превышает 0,1 % белизны при изменении освещенности от источника излучения А на 20 %. Эта величина совпадает с значением, полученным на эталонном образце из сульфата бария №ОКП2. Для сравнения были проведены измерения спектральной яркости отражающей поверхности образца материала из фторопласта, имеющего повышенную прозрачность по сравнению со стеклом МС-20. В эксплуатации в настоящее время находятся значительное количество эталонов, изготовленных из этого материала с наполнителями для создания образцов с различными значениями белизны. Погрешность измерения белизны здесь возросла до 0,33 % при тех же условиях, что свидетельствует о непригодности данного материала для изготовления эталонов.

Для обеспечения единства измерений, устройство освещения/наблюдения выполнено в соответствии с требованиями ISO 2469-77 [11], в котором определена геометрия этого устройства, а также источники излучения А и Д65. По-

грешность измерения в устройстве освещения/наблюдения может возникнуть также из-за изменения вследствие деградации коэффициента отражения покрытия внутренней поверхности сферы или посторонних засветок. Для исключения такой погрешности достаточно проводить периодическую калибровку прибора.

3. Оценка суммарной погрешности измерения спектроколориметра

Расчет погрешности проведен отдельно для источников А и Д65, так как в последнем случае появляются дополнительные погрешности. Погрешность спектроколориметра определена в соответствии с методикой математической обработки равнорассеянных наблюдений [12].

3.1. Источник излучения А

Для источника А были определены следующие составляющие суммарной погрешности измерений относительно эталона белизны:

- случайная погрешность, связанная с колебаниями мощности излучения источника А, вычисленная оценка среднеквадратичного отклонения среднего (выборочный стандарт среднего) при этом составляет - $\delta_A = \pm 0,05\%$;
- абсолютная погрешность эталонного образца, указанная в свидетельстве об аттестации, которую принимаем за систематическую погрешность - $\theta_{\gamma_0} = \pm 0,3\%$;
- случайная погрешность, связанная с отклонением спектральных полос интерференционных фильтров от номинальных значений - $\delta_C = \pm 0,1\%$;
- систематическая погрешность, связанная с колебаниями температуры не учитывалась, т.к. она устраняется путем калибровки прибора;

Предполагается, что случайные погрешности распределены нормально. Доверительная вероятность принималась равной 0,95. При оценке погрешностей проводилось не менее 10 измерений.

Определим границы доверительного интервала для случайных погрешностей. Доверительные границы случайной погрешности при $P=0,95$

$$\Delta = t_p S_{\bar{X}}, \quad (1)$$

где – коэффициент Стьюдента $t_p = 2,3$ при 10 наблюдениях [13]. Здесь $S_{\bar{X}}$ - сумма случайных погрешностей,

$$S_{\bar{X}} = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_C^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,1^2} = 0,11\%, \text{ тогда}$$

$$\Delta = 2,3 \cdot 0,11\% = 0,25\%$$

Систематическая погрешность результата измерений определяется погрешностью эталона:

$$\theta = \sqrt{\Sigma\theta_i^2} = \sqrt{\theta_{ЭТ}^2} = 0,3\% \quad (2)$$

Как видно из результатов вычисления, отношение $\frac{\theta}{S_x} = 2,7$, т.е., $> 0,8$; поэтому в соответствии с [14] случайной погрешностью можно пренебречь. Полуширину доверительного интервала для систематической погрешности определяем согласно: $\Delta = \gamma\theta = 4 \cdot 0,3\% = 1,2\%$. Здесь $\gamma = 4$ для вероятности 0,95 определяется из неравенства Чебышева [13].

Таким образом, погрешность измерения белизны спектроколориметром при использовании источника А составляет 1,2 %.

3.2. Источник излучения Д65

При проведении измерений с источником Д65 были определены следующие погрешности относительно эталонного образца материала, содержащего люминесцентные добавки

- случайная погрешность, связанная с колебаниями на $\pm 0,5\%$ мощности источника, содержащего УФ излучение - $\delta_{УФ} = \pm 0,25\%$;
- случайная погрешность при изменении на $\pm 0,5\%$ мощности излучения источника А в составе Д65 - $\delta_A(Д65) = \pm 0,2\%$;
- погрешность эталонного образца для источника Д65, определенная на образцовом приборе, определяемая как систематическая погрешность - $\theta_{ЭТ} = \pm 0,5\%$;
- случайная погрешность, связанная с отклонением спектральной полосы интерференционных фильтров от стандарта - $\delta_C = \pm 0,1\%$;

Определим границы доверительного интервала для случайных и систематических погрешностей, в пределах которого находится погрешность измерения.

Границы случайной погрешности при доверительной вероятности $P = 0,95$ определяются зависимостью (1). Сумма случайных погрешностей равна: $S_x = \sqrt{\delta_{УФ}^2 + \delta_A^2(Д65) + \delta_C^2} = 0,33\%$, а полуширина интервала: $\Delta = 2,3 \cdot 0,33\% = 0,76\%$.

Для систематических составляющих результата измерений границы погрешностей определяются зависимостью (2). При этом

$$\theta = \sqrt{\theta_{ЭТ}^2} = 0,5\%$$

Поскольку, отношение $\frac{\theta}{S_x} = 1,5$; т.е., $> 0,8$,

то случайной погрешностью измерения, как и в случае с источником А, пренебрегаем и полуширина интервала систематических погрешностей измерения спектроколориметром с источником Д65 равна: $\Delta = \gamma\theta = 4 \cdot 0,5\% = 2\%$.

Таким образом, погрешность СК с источником Д65 определяется, в основном, систематической составляющей и находится в пределах $\pm 2\%$.

Для сравнения показаний СК «Колир» с аналогичными зарубежными приборами с дифракционной решеткой были проведены измерения приборами фирм «Минолта» (Япония), «Макбет» (США) и «Ультра Скан» (США), соответствующих стандарту ISO 2469-77, с использованием эталонных образцов, аттестованных в ВНИИОФИ. Измерения показали хорошее совпадение показаний приборов, в частности, расхождение по координатам цветности не превышает 0,007, по координатам цвета 0,8 %. Расхождение по измерению белизны образцов белой поверхности составило не более 0,2 % по отношению к СК «Минолта», 0,5 % - к СК «Макбет». На рис. 1 для сравнения показаны спектры отражения белого и цветного эталонов, измеренные приборами «Колир» и «Ультра Скан».

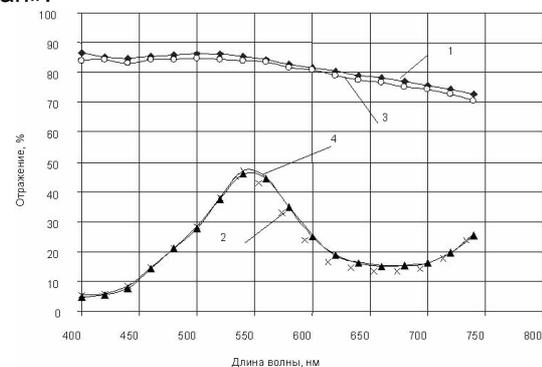


Рис.1. Спектральные коэффициенты отражения на белом и цветном (зеленом) образцах: 1,2 - Ultra ScanXE; 3,4 - «Колир»

Различие в показаниях приборов во всем видимом спектральном диапазоне не более 1,4 %. Соотношение цен приборов фирм «Минолта», «Макбет» и «Ультра Скан» следующее: 20 тыс. евро, 25 тыс. евро и 30 тыс. евро. Цена СК «Колир» составляет 7,5 тыс. евро, т.е. в 3-4 раза ниже зарубежных аналогов. В нем существенно упрощена процедура измерения и более рационально представлены результаты на средствах отображения информации.

Выводы

Результаты оценки погрешностей измерений спектроколориметром с интерференционными светофильтрами показывают, что их погрешности связаны, в основном, с систематической составляющей, обусловленной абсолютной погрешностью используемых эталонных образцов. Для работы прибора с источником типа А они не превышают 1,2 %, а при работе с источником Д65 находятся в пределах ± 2 %. Эти показатели хорошо согласуются с результатами неоднократно проводимых сравнительных испытаний приборов аналогичного типа зарубежного производства.

Литература

1. Папір і картон. Визначення білості за СІЕ, D65/10° (зовнішне денне освітлення). ISO 11475 : 99, IDT. (надано чинності ДСТУ від 14.04.2005 №91 з 2006-07-01) – К. Вид. Держспоживстандартів України, 2006, 10 с.
2. Бумага и картон – Определение белизны по СІЕ, C/2° (условия внутреннего освещения). ISO 11476 – 2000, IDT. (Действует с 14.05.2005 №91 с 2006-07-01) – К. Вид. Держспоживстандартів України, 2006, 11 с.
3. Бумага и картон. Метод определения белизны. ГОСТ 30113 – 94. Взамен ГОСТ 7690-76 в части определения белизны бумаги и картона. (Действует с 21.10.1996) – К. Изд. межгосударственных стандартов, 1994, 6 с.
4. Государственная поверочная схема для средств измерений координат цвета и координат цветности. ГОСТ 8.205 – 90. Действует с 01.07. 91) – М. Изд. стандартов, 1990, 4 с.
5. Бушинский В.О., Воронов С.А., Панкратов В.И., Родионов В.Н. Анализ методик определения белизны материалов с целью повышения точности и воспроизводимости результатов измерения // Киев, НТУУ «КПИ» «Электроника и связь», часть 3. – 2007. – с.38-41.
6. Троицкий А.С. Разработка методик и средств фотометрического контроля технологических процессов и настройки полиграфического оборудования: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.13 / Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна. – Санкт-Петербург, 2006 – 16 с.
7. Дитчберн Р. Физическая оптика. - М.: «Наука», 1965. - 631 с.
8. Нагибина И.М., Прокофьев В.К.. Спектральные приборы и техника спектроскопии. - Л: «Машиностроение», 1967. - 334с.
9. Фотометр белизны и цветовых характеристик «Колир».ТУ У 19021476.002 - 2001. (Действует с 07.08.2001). К. Держстандарт, 2001, 20с.
10. Источники света для измерения цвета. Типы. Технические требования. Маркировка. ГОСТ 7721 –89. (Действует с 1.07.90) – М. Изд. стандартов, 1989, 19 с.
11. Папір, картон та целюлоза. Вимірювання коефіцієнта дифузного відбиття. ISO 2469 – 77. (ГОСТ 30116-94 або ДСТУ 2571-94). (Діє від 1996-01-01) – К. Держстандарт, 1995, 8 с.
12. Иванников Д.А., Фомичев Е.Н. Основы метрологии и метрологического контроля: Учебное пособие. - Нижний Новгород: Нижегородский гос. техн. Университет, 2001. - 326 с.
13. Деденко Л.Г., Керженцев В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. - М.: изд. МГУ, 1977. - 112 с.
14. Основы метрології та вимірювальної техніки: Навч. посіб. / Дорожовець М., Стадник Б., Мотало В. та ін. - т.1, Львів: видавн."Львівська політехніка", 2005. - 532 с.