

## ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ФОТОМЕТРАХ ТИПА ЛЕЙКОМЕТРА ЦЕЙССА ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ ВМЕСТО ИСКУССТВЕННОГО ИСТОЧНИКА D<sub>65</sub>

© 2014 г. Е. И. Горицкий, канд. техн. наук

ООО «Квант», Санкт-Петербург

E-mail: goritskaya@mail.ru

На примере лейкометра Цейсса с лампой накаливания, исходя из общей фотометрической теории шарового фотометра и закономерностей, описывающих явление флуоресценции, показано, что на подобных упрощенных шаровых спектрофотометрах с зональными светофильтрами (фотометрах) с источником любого спектрального состава в УФ области (при определенных поглощающих и излучающих свойствах белых флуоресцирующих испытуемых образцов) можно получать значения флуоресцентной добавки к их действительным коэффициентам отражения (яркости), совпадающие со значениями, которые получились бы с искусственным источником стандартного излучения D<sub>65</sub>. На модернизированном лейкометре получены экспериментальные результаты, подтверждающие возможность замены в рабочих фотометрах типа лейкометра искусственного источника стандартного излучения D<sub>65</sub> на лампу накаливания.

*Ключевые слова:* монохроматор, фотометр, коэффициент отражения, флуоресценция, ультрафиолет.

Коды OCIS: 120.0120; 260.0260.

*Поступила в редакцию 18.11.2013.*

В настоящее время для повышения белизны выпускаемых белых материалов (бумаги, текстиля и т.д.) широко применяются оптические отбеливающие вещества (ООВ). В зарубежной литературе эти вещества принято называть «флуоресцентными отбеливателями» [1]. Эти вещества при освещении их ультрафиолетовым (УФ) излучением испускают сплошную по спектру полосу флуоресцентного излучения в видимой области. Белизна образцов материалов с ООВ контролируется по результатам измерений их общих (эффективных) коэффициентов отражения (яркости) с помощью шаровых фотометрических приборов – спектрофотометров с монохроматором и упрощенных спектрофотометров с зональными светофильтрами (фотометров), в которых монохроматор и зональный светофильтр соответственно находятся за фотометрическим шаром перед приемником прибора, а испытуемый (стандартный) образец освещается «белым» светом используемого в приборе источника освещения. Подобные современные приборы имеют геометрию  $d/0$ ,

а в качестве источника света используется искусственный источник стандартного излучения D<sub>65</sub>, созданный обычно на базе ксеноновой лампы высокого давления. Создание искусственного источника D<sub>65</sub> на базе лампы накаливания теоретически возможно, но для этого придется настолько ослабить ее излучение в видимой области, что надежная регистрация отраженных потоков станет невозможной [1–3]. А можно ли вообще обойтись без искусственного источника D<sub>65</sub>, по крайней мере, при создании рабочих фотометров, предназначенных для контроля белизны флуоресцирующих белых материалов на заводах, выпускающих такую продукцию, где не требуется та высокая точность измерений, которую обеспечивают современные дорогостоящие спектрофотометры?

В данной работе на примере лейкометра<sup>1</sup> Цейсса, исходя из общей теории фотометрического шара показано, что, по крайней мере,

<sup>1</sup> К приборам данного типа автор относит фотометры как геометрии  $0/d$ , так и  $d/0$ , в которых объект освещается «белым» светом источника освещения.

в случае, когда стандартный и испытуемые образцы отбелены одним и тем же ООВ, на подобных фотометрах можно получать значения флуоресцентной добавки к действительным коэффициентам отражения образцов, практически совпадающие со значениями, которые получались бы с искусственным источником D<sub>65</sub>. Описаны операции по модернизации серийного лейкометра с лампой накаливания, обеспечившие регулируемую, избыточную по сравнению с источником D<sub>65</sub> долю УФ излучения в свете, освещающем испытуемый образец. На модернизированном лейкометре получены экспериментальные результаты, подтверждающие возможность использования в подобных фотометрах лампы накаливания вместо искусственного источника D<sub>65</sub>.

При измерениях на лейкометре с синим светофильтром<sup>2</sup> коэффициентов отражения (КО) белых образцов с ООВ в измерительный фотоэлемент через светофильтр проходит как действительно отраженный от них свет, так и флуоресцентное излучение, испускаемое образцами под действием УФ излучения, содержащегося в свете источника освещения. Принимая это во внимание, результат измерения общего КО таких образцов  $r^*$  на лейкометре с синим светофильтром можно выразить следующим образом [4, 5]:

$$r^* = R_{CO} \frac{n + \Delta n}{n_{CO}}, \quad (1)$$

где  $R_{CO}$  – результат калибровки применяемого при измерениях нефлуоресцирующего стандартного образца (СО);  $n$  – фототок измерительного фотоэлемента лейкометра, вызванный светом, действительно отраженным от испытуемого образца;  $\Delta n$  – фототок, вызванный испускаемым им флуоресцентным излучением;  $n_{CO}$  – фототок, вызванный светом, отраженным от СО.

Перепишем (1) в виде

$$r^* = r + \Delta r, \quad (2)$$

где  $r = R_{CO} \frac{n}{n_{CO}}, \quad (3)$

$$\Delta r = R_{CO} \frac{\Delta n}{n_{CO}}. \quad (4)$$

<sup>2</sup> Лейкометр представляет собой двухлучевой фотометр, имеющий геометрию  $0/d$ . Поэтому здесь и в дальнейшем, в соответствии с общепринятой терминологией, будем говорить об измерениях на этом приборе коэффициентов отражения [2].

Здесь  $r$  и  $\Delta r$  – слагаемые результата измерения  $r^*$  общего КО флуоресцирующего испытуемого образца, соответствующие действительно отраженному от него потоку излучения и флуоресцентному. Применяемые при измерениях на лейкометре стандартные образцы имеют диффузный характер отражения. Такой же характер действительно отраженного света имеют образцы белых материалов с ООВ. Исходя из общей фотометрической теории шарового фотометра [6], в ранее опубликованных работах автора [4, 5] было получено интегральное фотометрическое равенство, выполняющееся для результата измерения  $r$  с помощью фотометра типа лейкометра КО, когда СО и нефлуоресцирующий испытуемый образец имеют диффузный характер отражения<sup>3</sup>. Принимая во внимание это равенство, по аналогии с ним, для флуоресцентной составляющей  $\Delta r$  (4) результата измерения  $r^*$  (2) на лейкометре с синим светофильтром общего КО флуоресцирующего белого испытуемого образца можно написать

$$\Delta r = R_{CO} \frac{\int_{400}^{520} \tau(\lambda) \Phi_{\lambda, f} C(\lambda) F_f(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{520} \tau(\lambda) \Phi_{\lambda} C(\lambda) F_{CO}(\lambda) r_{CO}(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

где  $\tau(\lambda)$  – спектральный коэффициент пропускания синего светофильтра лейкометра;  $\Phi_{\lambda, f}$  – спектральная плотность сплошного по спектру потока флуоресцентного излучения, испускаемого испытуемым образцом;  $C(\lambda)$  – спектральная чувствительность измерительного фотоэлемента лейкометра к излучению, падающему на него по нормали к его поверхности;  $F_f(\lambda)$  и  $F_{CO}(\lambda)$  – спектральные значения специальной функции  $F$  [4, 5, 7], соответствующие потоку флуоресцентного излучения, испускаемому испытуемым образцом, и потоку, диффузно отраженному от используемого при измерениях стандартного образца;  $\Phi_{\lambda}$  – спектральная плотность потока излучения лампы накаливания;  $r_{CO}(\lambda)$  – истинный спектральный КО стандартного образца для геометрии оптической схемы лейкометра;  $R_{CO}$  – результат калибровки СО; 400–520 нм – область пропускания синего светофильтра лейкометра. Известно, что распределения спектральной плотности флуоресцентного излучения  $\Phi_{\lambda, f}$  в полосе испускания белыми образцами с ООВ имеют колоколообразную

<sup>3</sup> В данной работе нас будет интересовать только флуоресцентная составляющая  $\Delta r$  результата измерения  $r^*$  общего КО испытуемого образца. Поэтому на слагаемом  $r$  (3) останавливаться не будем.

форму [2]. Принимая это во внимание, очевидно, для  $\Phi_{\lambda, f}$  можно написать

$$\Phi_{\lambda, f} = L(\lambda)\Phi_{\lambda_{\max}, f}, \quad (6)$$

где  $\Phi_{\lambda_{\max}, f}$  – спектральная плотность флуоресцентного излучения при длине волны  $\lambda_{\max}$ , соответствующей максимуму распределения  $\Phi_{\lambda, f}$  в полосе испускания;  $L(\lambda)$  – функция, описывающая форму распределения  $\Phi_{\lambda, f}$  в полосе  $\lambda_1 - \lambda_2$  флуоресцентного испускания данным ООВ, значения которой увеличиваются от нуля на ее границах до единицы при  $\lambda = \lambda_{\max}$ . Так же как и в работах [5, 7], будем считать, что  $r_{\text{CO}}(\lambda)$  в области 400–520 нм изменяется линейно, т.е.

$$r_{\text{CO}}(\lambda) = A_{\text{CO}}\lambda + B_{\text{CO}}. \quad (7)$$

Подставив это выражение для  $r_{\text{CO}}(\lambda)$  и выражение (6) для  $\Phi_{\lambda, f}$  в (5) и проведя ряд несложных операций, получим соотношение для  $\Delta r$

$$\Delta r = R_{\text{CO}}K_{z, f} \frac{1}{r_{\text{CO}}(\lambda_{\text{ef}})} \frac{\Phi_{\lambda_{\max}, f}}{\bar{\Phi}_{\lambda}} L(\lambda_f), \quad (8)$$

где

$$K_{z, f} = \frac{\int_{400}^{520} \tau(\lambda)C(\lambda)F_f(\lambda)d\lambda}{\int_{400}^{520} \tau(\lambda)C(\lambda)F_{\text{CO}}(\lambda)d\lambda}, \quad (9)$$

$$\lambda_{\text{ef}} = \frac{\int_{400}^{520} \tau(\lambda)\Phi_{\lambda}C(\lambda)F_{\text{CO}}(\lambda)d\lambda}{\int_{400}^{520} \tau(\lambda)\Phi_{\lambda}C(\lambda)F_{\text{CO}}(\lambda)d\lambda}, \quad (10)$$

$$\bar{\Phi}_{\lambda} = \frac{\int_{400}^{520} \tau(\lambda)\Phi_{\lambda}C(\lambda)F_{\text{CO}}(\lambda)d\lambda}{\int_{400}^{520} \tau(\lambda)C(\lambda)F_{\text{CO}}(\lambda)d\lambda}, \quad (11)$$

$$L(\lambda_f) = \frac{\int_{400}^{520} \tau(\lambda)L(\lambda)C(\lambda)F_f(\lambda)d\lambda}{\int_{400}^{520} \tau(\lambda)C(\lambda)F_f(\lambda)d\lambda}. \quad (12)$$

Здесь  $K_{z, f}$  – коэффициент, определяющий погрешность измерения КО по схеме замещения, реализованной в лейкометре;  $\lambda_{\text{ef}}$  – эффективная длина волны лейкометра с синим светофильтром при измерениях в свете лампы накаливания, которая является собственной характеристикой данного прибора [5, 7];  $\bar{\Phi}_{\lambda}$  – значение спектральной плотности потока излучения лампы накаливания, усредненное по длинам волн в полосе пропускания синего светофильтра лейкометра;  $L(\lambda_f)$  – значение функции  $L(\lambda)$  при некой длине волны  $\lambda_f$  в области 400–520 нм. Спектральные значения функции

$F_f(\lambda)$  в (12), соответствующие белым флуоресцирующим испытуемым образцам, так же как и значения функции  $F_{\text{CO}}(\lambda)$  в (10), в этой области, очевидно, изменяются незначительно [4]. Поэтому можно считать, что любому образцу, отбеленному данным ООВ, при измерениях на данном лейкометре соответствует значение функции  $L(\lambda)$  при одной и той же длине волны  $\lambda_f - L(\lambda_f)$ . Для данного лейкометра и данного используемого при измерениях стандартного образца  $R_{\text{CO}}$  и  $r_{\text{CO}}(\lambda_{\text{ef}})$  в (8) имеют вполне определенные значения. Все остальные множители, за исключением спектральной плотности флуоресцентного излучения  $\Phi_{\lambda_{\max}, f}$  при длине волны  $\lambda_{\max}$  максимума распределения  $\Phi_{\lambda, f}$  (6) в полосе испускания, имеют определенные аналитические выражения (9), (11), (12). Выведем аналитическое выражение для  $\Phi_{\lambda_{\max}, f}$  исходя из известных экспериментально установленных закономерностей и понятий, описывающих явление флуоресценции.

Кроме понятия квантового выхода флуоресценции, которое всегда используется в литературе при описании этого явления, существует понятие спектрального энергетического выхода  $q(\mu)$  флуоресцентного излучения [1, 2, 8, 9]. Его определяют как отношение суммарной энергии флуоресценции  $d\Phi_f(\mu)$  (в пределах всей полосы испускания флуоресцирующего объекта) к поглощенной монохроматической энергии  $d\Phi_{\alpha}(\mu)$  длины волны  $\mu$ , находящейся внутри полосы поглощения возбуждающего излучения  $\mu_1 - \mu_2$ . В результате проведенных автором исследований было установлено, что большинство используемых в нашей стране ООВ поглощают энергию в области 320–420 нм, а испускают сплошную полосу флуоресцентного излучения в области 400–550 нм. Образцы с ООВ, имеющие иные границы полос поглощения и флуоресцентного испускания, автору не встречались. Поэтому в дальнейшем при изложении материала автор будет исходить из указанных границ.

Для спектрального энергетического выхода  $q(\mu)$  флуоресцентного излучения, испускаемого белыми образцами с ООВ, можно написать

$$q(\mu) = \frac{d\Phi_f(\mu)}{d\Phi_{\alpha}(\mu)} = \frac{\int_{400}^{550} d\Phi_{\lambda, f}^{\mu} d\lambda}{\Phi_{\mu}[1 - r(\mu) - \tau(\mu)]d\mu}. \quad (13)$$

Здесь  $d\Phi_{\lambda, f}^{\mu}$  – спектральная плотность флуоресцентного излучения, возбужденного монохроматическим излучением длины волны  $\mu$

в области 320–420 нм;  $\Phi_\mu$  – спектральная плотность падающего на флуоресцирующий образец излучения данной длины волны  $\mu$ ;  $r(\mu)$  и  $\tau(\mu)$  – спектральные коэффициенты отражения и пропускания флуоресцирующего образца соответственно при данной  $\mu$  [2]. Монохроматические излучения разных длин волн в пределах всей полосы поглощения возбуждают разные по мощности полосы флуоресцентного излучения, но одного и того же спектрального состава [2, 9]. Суммарное флуоресцентное излучение, обеспеченное возбуждающим действием света в пределах всей полосы поглощения  $\Phi_{\lambda, f}$ , имеет такой же спектральный состав, который описывается функцией  $L(\lambda)$  (6). Принимая это во внимание, перепишем (13) в виде

$$q(\mu) = \frac{d\Phi_f(\mu)}{d\Phi_\alpha(\mu)} = \frac{d\Phi_{\lambda_{\max}, f}^\mu \int_{400}^{550} L(\lambda) d\lambda}{\Phi_\mu \alpha(\mu) d\mu}, \quad (14)$$

где  $d\Phi_{\lambda_{\max}, f}^\mu$  – спектральная плотность флуоресцентного излучения, возбужденного монохроматическим излучением длины волны  $\mu$ , при длине волны  $\lambda_{\max}$ , соответствующей максимуму его распределения в полосе испускания;  $\alpha(\mu) = 1 - r(\mu) - \tau(\mu)$  – спектральный коэффициент поглощения монохроматического излучения при длине волны  $\mu$ . С учетом (14) для спектральной плотности суммарного флуоресцентного излучения (при  $\lambda_{\max}$ )  $\Phi_{\lambda_{\max}, f}$ , возбуждаемого источником света, имеющим сплошной спектр излучения в области поглощения, очевидно, можно записать

$$\Phi_{\lambda_{\max}, f} = \frac{\int_{320}^{420} \Phi_\mu q(\mu) \alpha(\mu) d\mu}{\int_{400}^{550} L(\lambda) d\lambda}. \quad (15)$$

Лучистый поток флуоресценции строго пропорционален падающему, возбуждающему потоку [2]. Поэтому спектральный энергетический выход  $q(\mu)$  флуоресцентного излучения в (13)–(15) для данного образца является его собственной характеристикой и не зависит от абсолютного значения спектральной плотности излучения  $\Phi_\mu$ , возбуждающего флуоресценцию. Спектральный коэффициент поглощения  $\alpha(\mu)$  образца также является его собственной характеристикой, не зависящей от  $\Phi_\mu$ . Квантовый выход флуоресцирующих веществ, и ООВ в частности, как правило, имеет постоянное значение практически во всей полосе поглощения [2, 8, 9]. При этом спектральный энергетический

выход флуоресцентного излучения  $q(\mu)$  пропорционален длине волны  $\mu$  поглощенного излучения [9] (закон С. И. Вавилова), т.е

$$q(\mu) = a\mu, \quad (16)$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности, имеющий для данного флуоресцирующего образца одно и то же значение в области 320–420 нм. Подставив это выражение для  $q(\mu)$  в (15) и проведя ряд несложных операций, получим

$$\Phi_{\lambda_{\max}, f} = a\mu_{\text{ef}} \frac{\int_{320}^{420} \Phi_\mu \alpha(\mu) d\mu}{L}, \quad (17)$$

$$\mu_{\text{ef}} = \frac{\int_{320}^{420} \Phi_\mu \alpha(\mu) \mu d\mu}{\int_{320}^{420} \Phi_\mu \alpha(\mu) d\mu}, \quad (18)$$

$$L = \int_{400}^{550} L(\lambda) d\lambda. \quad (19)$$

Подставив выражение (17) для  $\Phi_{\lambda_{\max}, f}$  в (8), в итоге для флуоресцентной составляющей  $\Delta r$  результата измерения на лейкометре общего КО  $r^*$  (2) испытуемого образца получим

$$\Delta r = R_{\text{CO}} K_{z, f} \frac{1}{r_{\text{CO}}(\lambda_{\text{ef}})} \frac{L(\lambda_f)}{L} a\mu_{\text{ef}} \frac{\int_{320}^{420} \Phi_\mu \alpha(\mu) d\mu}{\bar{\Phi}_\lambda}. \quad (20)$$

Представим, что мы имеем два флуоресцирующих белых образца, отбеленных в разной степени одним и тем же ООВ. При измерениях на данном лейкометре КО таких образцов относительно одного и того же СО в соответствующих этим образцам выражениях для  $\Delta r$  значения  $R_{\text{CO}}$ ,  $r_{\text{CO}}(\lambda_{\text{ef}})$ ,  $L(\lambda_f)$ ,  $L$ ,  $\bar{\Phi}_\lambda$  и  $\Phi_\mu$  одни и те же. Тогда отношение  $\Delta r''/\Delta r'$  определяется как

$$\frac{\Delta r''}{\Delta r'} = \frac{K_{z, f}'' a'' \mu_{\text{ef}}''}{K_{z, f}' a' \mu_{\text{ef}}'} \frac{\int_{320}^{420} \Phi_\mu \alpha''(\mu) d\mu}{\int_{320}^{420} \Phi_\mu \alpha'(\mu) d\mu}. \quad (21)$$

В общем случае распределения спектральных коэффициентов поглощения  $\alpha''(\mu)$  и  $\alpha'(\mu)$  рассматриваемых образцов по длинам волн в области  $\mu_1$ – $\mu_2$ , вероятно, могут иметь разную форму. При значительном отличии распределений  $\alpha''(\mu)$  и  $\alpha'(\mu)$  по форме, в соответствии с (21), отношение  $\Delta r''/\Delta r'$  будет зависеть от спектрального состава  $\Phi_\mu$  источника света в области поглощения излучения, возбуждающего флуоресценцию. Представляет интерес рассмотрение частного случая, когда распределения

спектральных коэффициентов поглощения  $\alpha''(\mu)$  и  $\alpha'(\mu)$  образцов подобны, т. е.

$$\alpha''(\mu) = C\alpha'(\mu), \quad (22)$$

где  $C = \text{const}$  в области  $\mu_1 - \mu_2$ . При этом  $\mu''_{\text{ef}} = \mu'_{\text{ef}}$  (18) и равенство (21) примет вид

$$\frac{\Delta r''}{\Delta r'} = \frac{K''_{z,f}}{K'_{z,f}} \frac{a''}{a'} C. \quad (23)$$

Таким образом, в рассматриваемом частном случае получаем, что отношение  $\Delta r''/\Delta r'$  не зависит от спектрального состава  $\Phi_\mu$  источника в области  $\mu_1 - \mu_2$ . Это означает, что в этом случае, при измерениях КО на серийном лейкометре с лампой накаливания, отношение  $\Delta r''/\Delta r'$  будет иметь такое же значение, какое оно имело бы с источником  $D_{65}$ . В свете лампы накаливания содержится значительно меньшая доля УФ излучения, чем в свете источника  $D_{65}$ . Поэтому с лампой накаливания соответствующие рассматриваемым образцам абсолютные значения  $\Delta r''$  и  $\Delta r'$  значительно меньше, чем с  $D_{65}$ . С учетом сказанного, можно утверждать, что в том случае, когда испытуемые на лейкометре белые образцы отбелены с помощью одного и того же ООВ или ООВ, имеющих достаточно близкий друг к другу спектральный состав флуоресцентного излучения, а также если спектры поглощения  $\alpha_i(\mu)$  ( $i = 1, 2 \dots n$ ) испытуемых флуоресцирующих белых образцов подобны (22) в полосе поглощения  $\mu_1 - \mu_2$ , то на лейкометре с лампой накаливания возможно получение и абсолютных значений флуоресцентной составляющей  $\Delta r_i$  результатов измерений их общих КО  $r_i^*$  (2), которые получались бы с источником  $D_{65}$ . Но для этого необходима модернизация лейкометра, в результате которой появилась бы возможность получения в падающем на образец свете избыточной по сравнению с источником  $D_{65}$  доли возбуждающего флуоресценцию УФ излучения (возможность увеличения отношения  $\int_{320}^{420} \Phi_\mu \alpha(\mu) d\mu / \bar{\Phi}_\lambda$ ) и плавной регулировки этой доли.

Поглощающие свойства образцов с ООВ в области  $\mu_1 - \mu_2$ , по-видимому, в основном определяются поглощающими свойствами отбеливателя. Поэтому можно предположить, что спектральные кривые поглощения образцов  $\alpha_i(\mu)$ , отбеленных в разной степени одним и тем же ООВ, в этой области по крайней мере, по форме близки друг другу. Именно на основании этого предположения и изложенных выше

соображений, автор провел модернизацию имеющегося в его распоряжении лейкометра. Рассмотрим проведенные при этом операции.

Прежде всего была реализована возможность отдельного измерения на лейкометре коэффициентов отражения  $r_i$  (3) белых флуоресцирующих образцов без флуоресцентных добавок  $\Delta r_i$  (4). Для этого в шторке, перекрывающей при ее введении поступающий в прибор свет, соосно с его оптической осью было сделано отверстие, в которое была вставлена оправа со светофильтром из стекла ЖС11 ( $d = 3,2$  мм,  $\tau(\lambda) \geq 0$  при  $\lambda \geq 420$  нм). Этот светофильтр полностью поглощает излучение, возбуждающее флуоресценцию испытуемых образцов с ООВ, и поэтому обеспечивает возможность измерения на лейкометре их КО  $r_i$  без флуоресцентных добавок<sup>4</sup> –  $\Delta r_i$ . Соответственно, стал возможным расчет  $\Delta r_i$  испытуемых образцов исходя из формулы (2)

$$\Delta r_i = r_i^* - r_i. \quad (24)$$

Затем, непосредственно за конденсором лейкометра, был установлен комбинированный светофильтр из цветных стекол, преобразующий излучение лампы накаливания в излучение стандартного источника дневного света С [10]. В спектре излучения источника С доля УФ излучения значительно больше, чем в спектре лампы накаливания, но меньше, чем в спектре стандартного источника  $D_{65}$ . Поэтому были необходимы дополнительные операции для увеличения доли УФ излучения в свете, падающем в лейкометре на испытуемый образец. Для этого в измерительном канале прибора<sup>5</sup>, непосредственно за фокусирующей линзой, проектирующей изображение оправы конденсора на поверхность испытуемого образца, был установлен светофильтр из стекла УФС5 толщиной 3,3 мм, в центре которого имелось отверстие диаметром 3 мм. Кроме того, вплотную к светофильтру была установлена ирисовая диафрагма, диаметр отверстия в которой можно было изменять от 3,5 мм до 18 мм. После установки указанного светофильтра часть прошедшего через фокусирующую линзу света без изменения своего спектрального состава, соответствующего источнику С, проходит через отверстие

<sup>4</sup> В современных приборах для полного устранения флуоресцентного излучения, испускаемого белыми материалами с ООВ, используется такой же светофильтр [1].

<sup>5</sup> Спектральный состав света, действующего в компенсационном канале лейкометра, на получаемые результаты измерений не влияет [4].

в светофильтре и падает на испытуемый образец. Вторая часть проходит через светофильтр, который полностью обрезает видимую область в спектре излучения искусственно созданного источника С и пропускает лишь некую долю УФ излучения<sup>6</sup>, содержащегося в его спектре. Часть этого излучения проходит через отверстие в ирисовой диафрагме и также падает на испытуемый образец. Чем больше отверстие в ирисовой диафрагме, тем большая доля прошедшего через светофильтр УФ излучения достигает поверхности испытуемого образца и добавляется к УФ излучению, прошедшему через отверстие в светофильтре. Как показал эксперимент, при полностью раскрытой диафрагме, за счет прошедшего через светофильтр дополнительного УФ излучения, на поверхности испытуемого образца создается освещение, соответствующее комбинированному источнику света, имеющему сплошной спектр излучения с избыточной, по сравнению с D<sub>65</sub>, долей возбуждающего флуоресценцию УФ излучения.

Для получения экспериментальных результатов, подтверждающих или опровергающих возможность замены в фотометрах типа лейкометра искусственного источника D<sub>65</sub> на лампу накаливания, на одном из крупных бумажных заводов, имеющих современный спектрофотометр Эльрефо 3000, было отобрано пятьдесят образцов бумаги с ООВ, представляющих продукцию завода за пять лет. В этот период на заводе использовался один и тот же ООВ – беллофор. Кроме указанного набора, в работе использовался также набор из образцов (отбеленных неизвестными автору ООВ) других двенадцати заводов (по одному с каждого). При эффективной длине волны<sup>7</sup>  $\lambda_{ef} = 457\text{нм}$  модернизированного лейкометра на Эльрефо 3000 были измерены общие спектральные коэффициенты яркости (КЯ)  $\beta_i^*(457)$  и спектральные КЯ  $\beta_i(457)$  отобранных образцов в действительно отраженном свете<sup>8</sup>. Значения  $\beta_i(457)$  образцов и значения спектральной флуоресцентной

добавки  $\Delta\beta_i(457)$  к их  $\beta_i(457)$ , рассчитанные по формуле

$$\Delta\beta_i(457) = \beta_i^*(457) - \beta_i(457), \quad (25)$$

варьировали в пределах от 64% до 88% и от 5% до 18% соответственно.

Затем были измерены общие КО  $r_i^*$  этих же образцов и их КО  $r_i$  в действительно отраженном свете на модернизированном лейкометре. При измерениях в качестве СО использовался флуоресцирующий образец бумаги из первого набора, который по результатам измерений на Эльрефо 3000 имел общий КЯ  $\beta_{CO}^*$  равный 76,8% и КЯ в отраженном свете  $\beta_{CO}$  равный 68,9% ( $\Delta\beta_{CO} = 7,9\%$ ). Первоначально измерялись  $r_i$  образцов. Для этого в действующий пучок света лейкометра вводился светофильтр ЖС 11, а на измерительном барабане устанавливалось  $R_{CO} = \beta_{CO} = 68,9\%$ , после чего измерения  $r_i$  образцов с выбранным СО проводились по обычным правилам. Как и следовало ожидать, величина  $r_i$  при изменении отверстия в ирисовой диафрагме сохраняла свои значения. Затем ЖС 11 выводился<sup>9</sup> и на измерительном барабане устанавливалось значение  $R_{CO} = \beta_{CO}^* = 76,8\%$ . Выбранный СО прижимался к отверстию в шаре лейкометра, и с помощью ирисовой диафрагмы уравнивались фототоки в его измерительном и компенсационном каналах. При этом сохранялись положения элементов настройки серийного лейкометра, которые использовались для уравнивания фототоков при измерениях  $r_i$ . Далее измерения общих КО  $r_i^*$  образцов проводились по обычным правилам. По результатам указанных измерений были рассчитаны флуоресцентные составляющие  $\Delta r_i$  результатов измерений общих КО  $r_i^*$  испытанных образцов по формуле (24). Лейкометр и Эльрефо 3000 имеют разную геометрию. Среди образцов из второго набора могли оказаться образцы, отбеленные другим ООВ. Несмотря на это, значения  $\Delta r_i$  всех без исключения испытанных образцов оказались практически совпадающими со значениями  $\Delta\beta_i$ , полученными на Эльрефо 3000. Максимальное отличие  $\Delta r_i$  от  $\Delta\beta_i$  достигало 0,75%, а его среднее арифметическое значение по всем образцам составило 0,28%. Указанная, вполне приемлемая для производителей, воспроизводимость результатов, полученных на совершенно разных приборах, является подтверждением ранее сделанного

<sup>6</sup> Эта доля определяется спектральной кривой пропускания светофильтра УФС5 в УФ области.

<sup>7</sup> Для определения  $\lambda_{ef}$  автор использовал набор светофильтров из нейтральных стекол и набор светофильтров из цветных стекол, спектральные кривые пропускания которых линейны в области пропускания синего светофильтра лейкометра [7].

<sup>8</sup> Эльрефо 3000 имеет геометрию  $d/0$ . Поэтому здесь автор использует термин “коэффициент яркости” и соответствующее обозначение –  $\beta$  [2].

<sup>9</sup> При выводе светофильтра первоначальная настройка лейкометра по СО не сбивалась.

автором предположения о том, что в полосе поглощения образцов  $\mu_1-\mu_2$ , отбеленных одним и тем же ООВ, зависимости их спектральных коэффициентов поглощения  $\alpha_i(\mu)$  по длинам волн с достаточно хорошей точностью совпадают по форме (22). Кроме того, указанная воспроизводимость полученных результатов объясняется тем, что возбуждающее действие света, падающего на флуоресцирующий образец, не зависит от направления, а также тем, что флуоресцентное излучение имеет высокую степень диффузности, подобную свету, отраженному от идеального отражающего рассеивателя [2, 9].

На каждом предприятии, выпускающем тот или иной белый материал, как правило, годами используют ООВ одной и той же марки. Это означает, что на основании полученных в данной работе результатов можно сделать вывод, что,

\* \* \* \* \*

по крайней мере в рабочих фотометрах типа лейкометра, вместо искусственного источника стандартного излучения  $D_{65}$  можно использовать обычную лампу накаливания.

Опробованная в данной работе идея была использована автором при модернизации обычного спектрофотометра (Spekol 11 с приставкой  $R d/0$ ), в котором фотометрический шар находится перед приёмником прибора, а в качестве источника света используется галогенная лампа накаливания, для обеспечения возможности измерения на нем спектральных КЯ белых материалов с ООВ в полосе флуоресцентного излучения. Воспроизводимость результатов, полученных на модернизированном спектрофотометре и Эльрефо 3000, оказалась еще лучше, чем в данной работе. Это окончательно убедило автора в справедливости сделанного вывода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рой С. Синклер, Дэвид Р. Баттл, Брайан Ригг, Кеннет Дж. Смит, Родерик Мак-Дональд, Джеймс Х. Ноббс, Линдсей В. Мак-Дональд, Андриан Р. Хилл. Цвет в промышленности. М.: Логос, 2002. 579 с.
2. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике / Пер с англ. под ред. Артюшина Л.Ф. / М.: Мир, 1978. 592 с.
3. Griesser R. Stand der instrumentellen Weissbewertung unter besonderer Berücksichtigung der Beleuchtung // Textilveredlung. 1983. V. 18. N 5. P. 157–162.
4. Горицкий Е.И. К теории измерений коэффициентов отражения светорассеивающих материалов на упрощенных шаровых спектрофотометрах с зональными светофильтрами // ОМП. 1990. № 5. С. 3–7.
5. Горицкий Е.И. Обеспечение единства измерений коэффициентов отражения белых светорассеивающих материалов на фотометрах типа ФО-1 и спектрофотометрах типа СФ-18 // Оптический журнал. 1993. № 5. С. 61–67.
6. Рвачев В.П. Методы оптики светорассеивающих сред в физике и биологии // Минск: Изд. БГУ, 1978. 240 с.
7. Горицкий Е.И. О теории и практике измерений коэффициентов отражения светорассеивающих материалов на упрощенных шаровых спектрофотометрах с зональными светофильтрами // Измерительная техника. 1993. № 8. С. 26–30.
8. Иванов А.П., Предко К.Г. Оптика люминесцентного экрана / Под ред. Степанова Б.И. Минск: Наука и техника, 1984. 272 с.
9. Шишловский А.А. Прикладная физическая оптика. М.: ФИЗМАТГИЗ, 1961. 822 с.
10. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1972. 375 с.