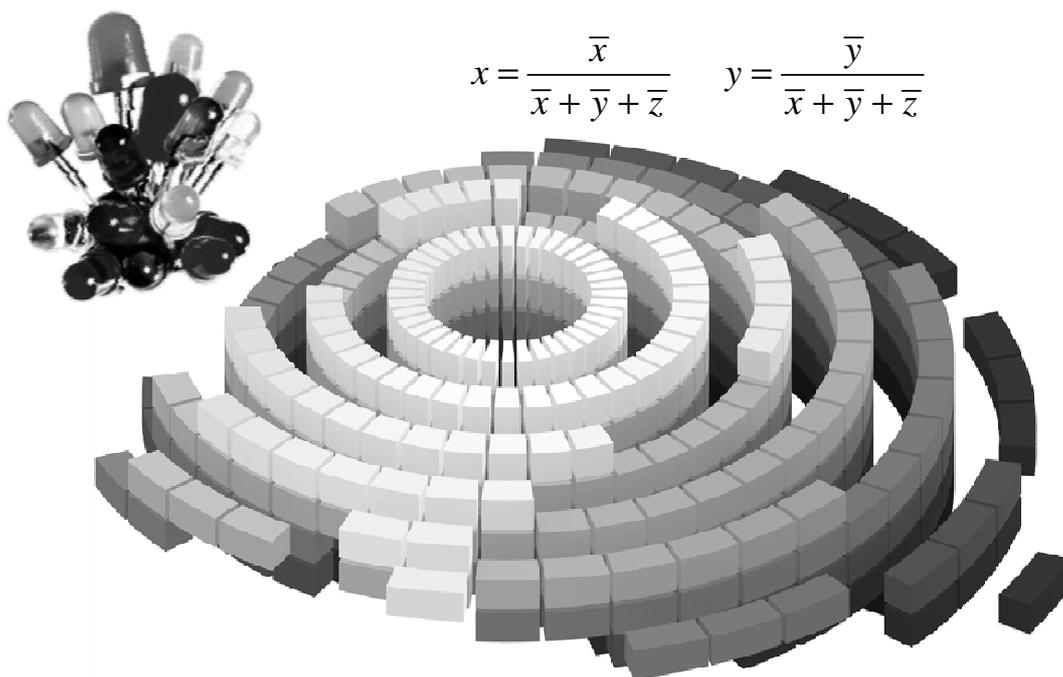


Горбунова Е.В., Чертов А.Н.

ТИПОВЫЕ РАСЧЕТЫ ПО КОЛОРИМЕТРИИ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ



$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} \quad y = \frac{\bar{y}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}$$

$$u' = \frac{4\bar{x}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}} \quad v' = \frac{9\bar{y}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}$$

Санкт-Петербург
2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

Горбунова Е.В., Чертов А.Н.

**ТИПОВЫЕ РАСЧЕТЫ ПО КОЛОРИМЕТРИИ
ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Учебное пособие



**Санкт-Петербург
2014**

Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Типовые расчеты по колориметрии источников излучения. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 90 с.

В учебном пособии приведены методики и порядок расчета цветовых координат и координат цветности источников излучения, а также общие правила выполнения расчетов их цветовой температуры и индекса цветопередачи.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистратуры 12.04.02 (200400) «Оптотехника» и по специальности 12.05.01 (200401) «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения».

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптотехники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистратуры 12.04.02 (200400) «Оптотехника» и специальности 12.05.01 (200401) «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения».



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2014

©Горбунова Е.В., Чертов А.Н., 2014

Содержание

СОКРАЩЕНИЯ.....	6
ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	7
1 РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЦВЕТА ПО СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМ КРИВЫМ	9
1.1 Способ взвешенных ординат	10
1.2 Способ избранных ординат.....	12
1.3 Расчет координат цветностей на цветовой диаграмме МКО 1931 г.	12
1.4 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 1976 г. CIE $Lu'v'$	13
1.5 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 2003 г. CIE $L^*a^*b^*$	14
1.6 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 1976 г. CIE $L^*u^*v^*$	15
1.7 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 1976 г. CIE LCH	15
1.7.1 Расчет при помощи цветowych координат CIE $L^*a^*b^*$	16
1.7.2 Расчет при помощи цветowych координат CIE $L^*u^*v^*$	16
1.8 Пример расчёта цветowych параметров источника по его спектру излучения.....	17
1.9 Вопросы для самопроверки	20
2 ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА. КОРРЕЛИРОВАННАЯ ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА.....	21
2.1 Спектр излучения Солнца.....	21
2.2 Спектр излучения абсолютно чёрного тела	22
2.3 Коррелированная цветковая температура	24
2.4 Расчет коррелированной цветковой температуры	26
2.5 Пример расчёта коррелированной цветковой температуры для заданного источника излучения.....	27
2.6 Вопросы для самопроверки	29
3 ПЕРЕСЧЕТ МЕЖДУ ЦВЕТОВЫМИ КООРДИНАТНЫМИ ПРОСТРАНСТВАМИ. КОЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ.....	30
3.1 Преобразование из XYZ в линейное пространство $R'G'B'$	30
3.1.1 Расчёт прямой матрицы пересчета.....	30
3.1.2 Колориметрическая коррекция	31
3.2 Преобразование из линейного пространства $R'G'B'$ в нелинейное RGB	32
3.2.1 Гамма преобразование	32
3.2.2 $sRGB$ преобразование	33
3.2.3 Яркостное преобразование	33
3.3 Алгоритм проведения пересчета XYZ – RGB	34

3.4	Пример пересчёта цветовых координат	35
3.5	Вопросы для самопроверки	37
4	ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАЛЫХ ЦВЕТОВЫХ РАЗЛИЧИЙ.....	38
4.1	Методика расчёта малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1950 г.	38
4.2	Методика расчёта малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1976 г.	38
4.3	Методика расчёта малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1994 г.	39
4.4	Методика расчёта малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 2000 г.	40
4.5	Методика расчёта малых цветовых различий по рекомендациям комитета по цветовым измерениям	42
4.6	Пример расчёта малых цветовых различий	44
4.7	Вопросы для самопроверки	45
5	РАСЧЕТ ИНДЕКСА ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА КРИВОЙ ПЛАНКА	46
5.1	Ограничения для проведения расчёта	46
5.2	Расчёт цветовых координат $L^*u^*v^*$	48
5.3	Расчёт цветовых разностей	49
5.4	Расчёт индекса цветопередачи	50
5.5	Пример расчёта индекса цветопередачи	50
5.6	Вопросы для самопроверки	54
6	РАСЧЁТ ИНДЕКСА ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ВНЕ КРИВОЙ ПЛАНКА	55
6.1	Определение цветовых координат	55
6.2	Расчёт адаптивного цветового сдвига	56
6.3	Расчёт индекса цветопередачи	56
6.4	Пример расчёта индекса цветопередачи	58
6.5	Вопросы для самопроверки	64
	Литература	65
	Приложения	67

СОКРАЩЕНИЯ

ИК – инфракрасный.

КЦТ – коррелированная цветовая температура.

МКО – международная комиссия по освещению.

УФ – ультрафиолетовый.

ЦТ – цветовая температура.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

A – источник, относительное спектральное распределение энергии которого в видимой области спектра соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре 2856°К (ГОСТ 7721-89).

B – источник, относительное спектральное распределение энергии которого в видимой области спектра соответствует излучения абсолютно черного тела при температуре 4874°К. Воспроизводит условия прямого солнечного освещения (ГОСТ 7721-89).

C – источник, относительное спектральное распределение энергии которого в видимой области спектра соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре 6774°К. Воспроизводит условия освещения рассеянным дневным светом (ГОСТ 7721-89).

c – скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с).

CRI – полный индекс цветопередачи.

CRI_i – частный индекс цветопередачи.

d – расстояние от точки, характеризующей исследуемый источник излучения, до ближайшей изотермической линий на цветовой диаграмме МКО 1976 г.

D_{65} – источник, относительное спектральное распределение энергии которого в видимой области спектра соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре 6504°К. Воспроизводит условия освещения усредненным дневным светом (ГОСТ 7721-89)

E – источник, спектральная плотность излучения которого в видимой области спектра постоянна.

h – постоянная Планка ($h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

$M(\lambda)$ – спектральное распределение светимости источника излучения.

k – постоянная Больцмана ($k = 1,38067 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

k_c – множитель.

$P_\lambda(\lambda)$ – спектральное распределение излучения источника.

$P_{\lambda_{\max}}$ – максимум спектрального распределения излучения источника.

$R_i(\lambda)$ – спектральное распределение отражательной способности i -той поверхности.

(r, f) – координаты цветностей в цветовом пространстве $Lu'v'$, характеризующие адаптивный цветовой сдвиг координат (u', v') при использовании исследуемого источника освещения.

T – температура в градусах Кельвина.

t – тангенс наклона изотермической линии.

T_c – цветовая температура источника излучения.

T'_c – коррелированная цветовая температура источника излучения.

u' , v' – координаты цветностей на цветовой диаграмме МКО 1976 г.

x , y – координаты цветностей на цветовой диаграмме МКО 1931 г.

\bar{x} , \bar{y} , \bar{z} – координаты цвета цветового пространства XYZ.

$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – кривые сложения цветов в $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$ системе измерения цвета.

\bar{x}_w , \bar{y}_w , \bar{z}_w – координаты цвета источника белого света в цветовом пространстве XYZ.

$\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$ – трехцветная система измерения цвета через три основных цвета \vec{X} , \vec{Y} и \vec{Z} .

λ – длина волны.

λ_{\max} – длина волны максимума спектрального распределения излучения источника.

1 РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЦВЕТА ПО СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМ КРИВЫМ

Цветовые параметры излучения источников характеризуются координатами цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г. (\bar{x} , \bar{y} , \bar{z}), координатами цветностей на цветовой диаграмме МКО 1931 г. (x , y) и координатами цветностей на цветовой диаграмме МКО 1976 г. (u' , v').

Для заданного спектрального распределения излучения источника $P_\lambda(\lambda)$, координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г. можно рассчитать по выражениям [1]:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= k_c \int_0^\infty P_\lambda(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ \bar{y} &= k_c \int_0^\infty P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ \bar{z} &= k_c \int_0^\infty P_\lambda(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda\end{aligned}\tag{1.1}$$

где $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ – кривые сложения цветов в $\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ системе измерения цвета, k_c – множитель.

Поскольку кривые сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ обычно задаются относительными значениями ординат, рассчитанные по ним координаты цвета будут иметь относительных характер [2, 3]. Во многих случаях, когда цель расчета заключается в определении координат цветности, этого достаточно. Поэтому общий множитель k_c можно опустить. Когда же процесс представляет абсолютная количественная мера цвета, обычно измеряется его яркость. Для расчета абсолютных значений яркости используется соотношение, устанавливающее, что 1 Вт монохроматического потока излучения с длиной волны 555 нм равен 683 лм светового потока. Относительную яркость можно оценить [4, 5], рассчитав

$$k_c = \frac{100}{\int_0^\infty P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}.\tag{1.2}$$

Следовательно, для источника излучения всегда цветовая координата

$$\bar{y} = \frac{100}{\int_0^\infty P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \cdot \int_0^\infty P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \text{ численно равна } 100.$$

При численном определении координат цвета выражение (1.1) непосредственно не используется, так как ни кривые сложения, ни спектральные характеристики излучения, как правило, не являются

простыми функциями, удобными для интегрирования. Кроме того, кривые сложения задаются таблично для дискретных значений длин волн (см. Приложение 1). Поэтому при практических расчетах интегрирование (1.1) заменяют суммированием соответствующих произведений для ряда длин волн, то есть:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= k_c \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \Delta\lambda \\ \bar{y} &= k_c \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda, \\ \bar{z} &= k_c \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \Delta\lambda\end{aligned}\tag{1.3}$$

при этом выражение (1.2) будет выглядеть как

$$k_c = \frac{100}{\sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda}.\tag{1.4}$$

Существуют два способа определения координат цвета по формулам (1.3):

- способ взвешенных ординат и
- способ избранных ординат.

1.1 Способ взвешенных ординат

При использовании **способа взвешенных ординат** суммируются произведения $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i)$, $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i)$ и $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i)$ для ряда значений длин волн видимого спектра с одинаковым интервалом $\Delta\lambda$. В большинстве случаев вполне достаточная точность расчета обеспечивается с интервалом 10 нм. При спектральных характеристиках излучения с крутыми склонами прибегают к суммированию с интервалом 5 нм, а при плавных характеристиках иногда оказывается достаточной точность расчетов и с интервалом 20 нм [1]. В общем, при выборе размера спектрального интервала для расчета координат цвета можно придерживаться правила, что этот интервал должен быть таким, чтобы использование меньшего интервала существенно не влияло на результат расчета. Для источников с узким спектром излучения, в частности светодиодов, имеет смысл суммировать с интервалом в 1 нм.

Расчеты координат цвета по (1.3) представляют собой, очевидно, приближенное определение площадей под кривыми $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i)$, $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i)$ и $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i)$. Эти площади разбиваются на участки шириной $\Delta\lambda$, а последние аппроксимируются прямоугольниками, как показано на рис. 1.1, при $\Delta\lambda = 20$ нм. Высоты прямоугольников равны значениям

функции $P_\lambda(\lambda_i)\bar{x}(\lambda_i)$, $P_\lambda(\lambda_i)\bar{y}(\lambda_i)$ и $P_\lambda(\lambda_i)\bar{z}(\lambda_i)$ для длин волн, находящихся в серединах интервалов $\Delta\lambda$.

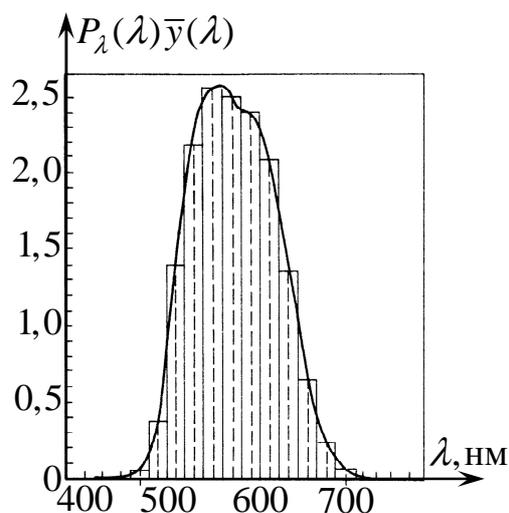


Рисунок 1.1 – Иллюстрация расчёта координат цвета по способу взвешенных ординат [1]

В расчетах по (1.3) и (1.4) ординаты функции спектрального распределения излучения взвешиваются тремя функциями сложения, поэтому данный способ расчета называется способом взвешенных ординат.

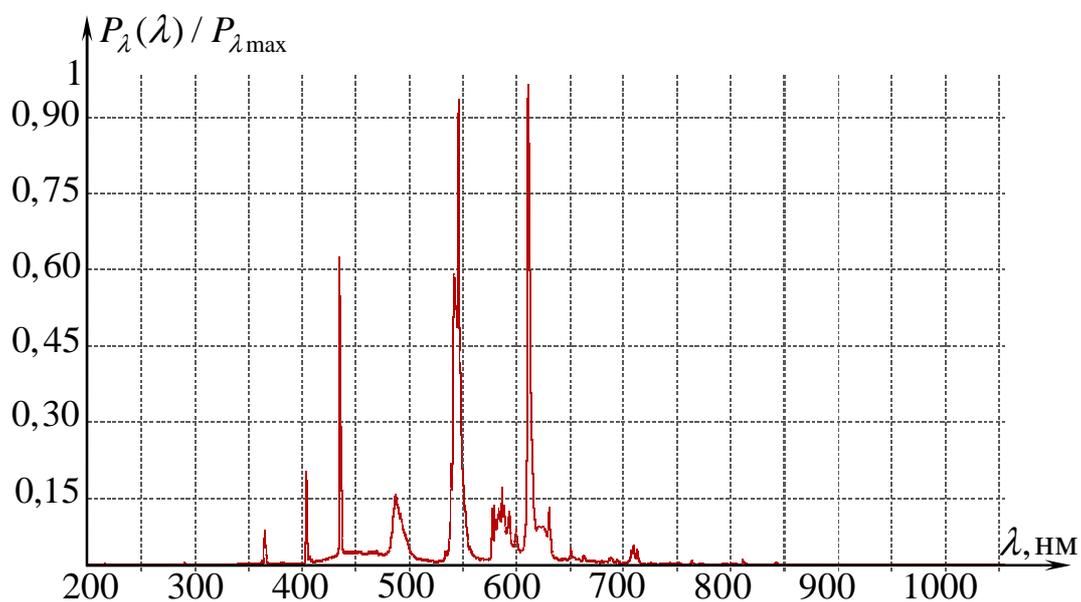


Рисунок 1.2 – Спектр люминесцентной лампы

Когда исследуется источник со смешанным спектром излучения, состоящим из непрерывного фона и отдельных спектральных линий, например люминесцентная лампа, спектр которой показан на рис. 1.2, в результаты расчета по способу взвешенных ординат иногда следует вводить поправки.

1.2 Способ избранных ординат

Метод **избранных ординат** основан на том, что интервал $\Delta\lambda$ делается переменным, и его значения по спектру можно подобрать таким образом, чтобы произведения $P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i$, $P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i$ и $P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i$ были одинаковыми для всех i . Тогда значение произведения можно вынести за знак суммы, и формула при расделении спектра на n интервалов имеет вид:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= k_c [P_\lambda(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \Delta\lambda_i] \sum_{i=1}^n i \\ \bar{y} &= k_c [P_\lambda(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda_i] \sum_{i=1}^n i. \\ \bar{z} &= k_c [P_\lambda(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \Delta\lambda_i] \sum_{i=1}^n i.\end{aligned}\tag{1.5}$$

Значения произведений перед знаком суммы различны для каждой кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ и для каждого источника излучения.

Таким образом, можно считать, что при определении координат цвета по способу избранных ординат также находятся площади под тремя кривыми, получающимися при взвешивании кривой результирующего спектрального распределения излучения источника тремя функциями сложения, но в отличие от способа взвешенных ординат, участки площадей под кривыми аппроксимируются прямоугольниками неравной ширины. Если изменить шкалу длин волн графика таким образом, чтобы эти прямоугольники имели одинаковую ширину, для нахождения координаты цвета достаточно было бы определить площадь по спектральной характеристике излучения, построенной на таком графике.

Видоизменение шкалы длин волн для каждой комбинации кривой сложения и источника излучения различно, как различно расположение избранных ординат по шкале длин волн для каждой такой комбинации.

1.3 Расчет координат цветностей на цветовой диаграмме МКО 1931 г.

Чтобы упростить представление определяемых цветов используется цветовая диаграмма МКО 1931 г [6]. Для её построения используются **координаты цветностей** x , y и z – относительные цветовые координаты

$$\begin{aligned}x &= \frac{\bar{x}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} \\ y &= \frac{\bar{y}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}\end{aligned},\tag{1.6}$$

где \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} – координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г., которые могут быть рассчитаны по спектральным характеристикам излучения анализируемого источника при помощи кривых сложения.

При этом учитывается соотношение координат цветностей

$$x + y + z = 1,$$

поэтому для представления цвета на цветовой диаграмме МКО 1931 г. используют только координаты цветностей (x, y) . Поскольку цвет определяется тремя параметрами, то к координатам цветностей (x, y) часто добавляют цветовую координату \bar{y} в качестве характеристики яркости.

1.4 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 1976 г. CIE $Lu'v'$

Попытки привести цветовую диаграмму МКО 1931 г к такому виду, чтобы эллипсы Мак-Адама приняли форму окружностей, привели к созданию цветовой диаграммы МКО 1976 г.

Данное цветовое пространство описывается одной координатой цвета L и двумя координатами цветностей u' и v' . Обычно в качестве точки белого используется стандартный источник типа E .

При этом координата цвета L характеризует яркость источника и приравнивается к цветовой координате \bar{y}

$$L = \bar{y},$$

координаты цветностей (u', v') рассчитываются по следующим соотношениям [7]

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4\bar{x}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}} \\ v' &= \frac{9\bar{y}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}} \end{aligned} \quad (1.7)$$

где \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} – координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г., которые могут быть рассчитаны по спектральным характеристикам излучения анализируемого источника при помощи кривых сложения. Третья координата цветности $w' = 1 - u' - v'$.

Координаты цветностей (u', v') можно также рассчитать по известным значениям координат цветностей (x, y) на диаграмме 1931 г. следующим образом [6]:

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \\ v' &= \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \end{aligned} \quad (1.8)$$

1.5 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 2003 г. CIE $L^*a^*b^*$

Данное цветовое пространство характеризуется наличием фиксированной точки белого (источника типа $D50$). Таким образом, цветовые параметры исследуемого источника рассчитываются при помощи цветовых параметров источника типа $D50$.

Сначала рассчитываются значения параметров $f(x)$, $f(y)$ и $f(z)$ по следующим законам [8]:

$$f(x) = \begin{cases} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{x}_{D50}}\right)^{1/3} & \text{если } \frac{\bar{x}}{\bar{x}_{D50}} > 0,00885645 \\ \left[903,3 \cdot \left(\frac{\bar{x}}{\bar{x}_{D50}}\right) + 16\right] / 116 & \text{иначе} \end{cases},$$

$$f(y) = \begin{cases} \left(\frac{\bar{y}}{\bar{y}_{D50}}\right)^{1/3} & \text{если } \frac{\bar{y}}{\bar{y}_{D50}} > 0,00885645 \\ \left[903,3 \cdot \left(\frac{\bar{y}}{\bar{y}_{D50}}\right) + 16\right] / 116 & \text{иначе} \end{cases}, \quad (1.9)$$

$$f(z) = \begin{cases} \left(\frac{\bar{z}}{\bar{z}_{D50}}\right)^{1/3} & \text{если } \frac{\bar{z}}{\bar{z}_{D50}} > 0,00885645 \\ \left[903,3 \cdot \left(\frac{\bar{z}}{\bar{z}_{D50}}\right) + 16\right] / 116 & \text{иначе} \end{cases},$$

где \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} – координаты цвета анализируемого источника в цветовом пространстве МКО 1931 г., которые могут быть рассчитаны по спектральным характеристикам излучения анализируемого источника при помощи кривых сложения; \bar{x}_{D50} , \bar{y}_{D50} и \bar{z}_{D50} – координаты цвета источника типа $D50$ в цветовом пространстве МКО 1931 г.

Формулы (1.9) были предложены к рассмотрению МКО в 2002 г. и введены в качестве стандарта расчета в 2003 г.

Далее рассчитываются значения цветовых координат L^* , a^* и b^* по следующим соотношениям [9]:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \cdot f(y) - 16 \\ a^* &= 500 \cdot [f(x) - f(y)], \\ b^* &= 200 \cdot [f(y) - f(z)] \end{aligned} \quad (1.10)$$

1.6 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 1976 г. СИЕ $L^*u^*v^*$

Данное цветовое пространство характеризуется наличием определенной точки белого. Для этого может быть использован любой стандартный источник излучения. Таким образом, цветовые координаты анализируемого источника определяются при помощи цветовых параметров выбранного стандартного источника излучения.

Сначала, подобно (1.9) рассчитывается значение параметра [8] $f(\bar{y}/\bar{y}_w)$:

$$f(\bar{y}/\bar{y}_w) = \begin{cases} \left(\frac{\bar{y}}{\bar{y}_w}\right)^{1/3} & \text{если } \frac{\bar{y}}{\bar{y}_w} > 0,00885645 \\ \left[903,3 \cdot \left(\frac{\bar{y}}{\bar{y}_w}\right) + 16\right] / 116 & \text{иначе} \end{cases}, \quad (1.11)$$

где \bar{y} – координата цвета анализируемого источника в цветовом пространстве МКО 1931 г., которая может быть рассчитана по спектральным характеристикам излучения анализируемого источника при помощи кривых сложения; \bar{y}_w – координата цвета выбранной точки белого в цветовом пространстве МКО 1931 г.

Далее значения цветовых координат L^* , u^* и v^* вычисляются по формулам [8]:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \cdot f(\bar{y}/\bar{y}_w) - 16 \\ u^* &= 13 \cdot L^* \cdot [u' - u'_w] \\ v^* &= 13 \cdot L^* \cdot [v' - v'_w] \end{aligned}, \quad (1.12)$$

где u' и v' – значения координат цвета анализируемого источника в цветовом пространстве МКО 1976 г. СИЕ $Lu'v'$; u'_w и v'_w – значения координат цвета выбранной точки белого в цветовом пространстве МКО 1976 г. СИЕ $Lu'v'$.

1.7 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 1976 г. СИЕ LCH

Координаты цвета LCH могут быть рассчитаны при помощи двух разных цветовых пространств: СИЕ $L^*a^*b^*$ и СИЕ $L^*u^*v^*$.

Цветовое тело пространства МКО 1976 г. СИЕ LCH представляет собой цилиндр. Следует иметь в виду, что цветовая координата H в данном цветовом пространстве выражается в угловой мере, в отличие от цветовых координат L и C .

1.7.1 Расчет при помощи цветовых координат CIE $L^*a^*b^*$

Значения цветовых координат в пространстве LCH рассчитываются по известным значениям цветовых координат $L^*a^*b^*$ путем проведения следующих вычислений [10]:

$$\begin{aligned}
 L &= L^* \\
 C_{ab} &= \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \\
 H_{ab} &= \begin{cases} \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) & \text{при } a^* > 0 \text{ и } b^* > 0 \\ \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) + 360^\circ & \text{при } a^* > 0 \text{ и } b^* < 0 \\ \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) + 180^\circ & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (1.13)
 \end{aligned}$$

где L^* , a^* и b^* могут быть рассчитаны по формулам (1.10).

Необходимо отметить, что рассчитанное значение цветовой координаты H_{ab} должно находиться в пределах $[0^\circ; 360^\circ]$.

Полученные таким образом цветовые координаты должны обозначаться нижним индексом ($_{ab}$).

1.7.2 Расчет при помощи цветовых координат CIE $L^*u^*v^*$

Значения цветовых координат в пространстве LCH рассчитываются по известным значениям цветовых координат $L^*u^*v^*$ путем проведения следующих вычислений [10]:

$$\begin{aligned}
 L &= L^* \\
 C_{uv} &= \sqrt{(u^*)^2 + (v^*)^2} \\
 H_{uv} &= \begin{cases} \arctan\left(\frac{v^*}{u^*}\right) & \text{при } u^* > 0 \text{ и } v^* > 0 \\ \arctan\left(\frac{v^*}{u^*}\right) + 360^\circ & \text{при } u^* > 0 \text{ и } v^* < 0 \\ \arctan\left(\frac{v^*}{u^*}\right) + 180^\circ & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (1.14)
 \end{aligned}$$

где L^* , u^* и v^* могут быть рассчитаны по формулам (1.12).

Необходимо отметить, что рассчитанное значение цветовой координаты H_{uv} должно находиться в пределах $[0^\circ; 360^\circ]$.

Полученные таким образом цветовые координаты должны обозначаться нижним индексом ($_{uv}$).

1.8 Пример расчёта цветовых параметров источника по его спектру излучения

Необходимо рассчитать цветовые параметры источника излучения, спектр которого представлен на рис. 1.3. При этом цветовые параметры указанного источника должны быть рассчитаны в цветовых пространствах МКО 1931 г. CIE XYZ, МКО 1976 г. $Lu'v'$, МКО 2003 г. $L^*a^*b^*$, МКО 1976 г. $L^*u^*v^*$, МКО 1976 г. $LC_{ab}H_{ab}$ и $LC_{uv}H_{uv}$, а также цветовой диаграмме МКО 1931 г. (x, y).

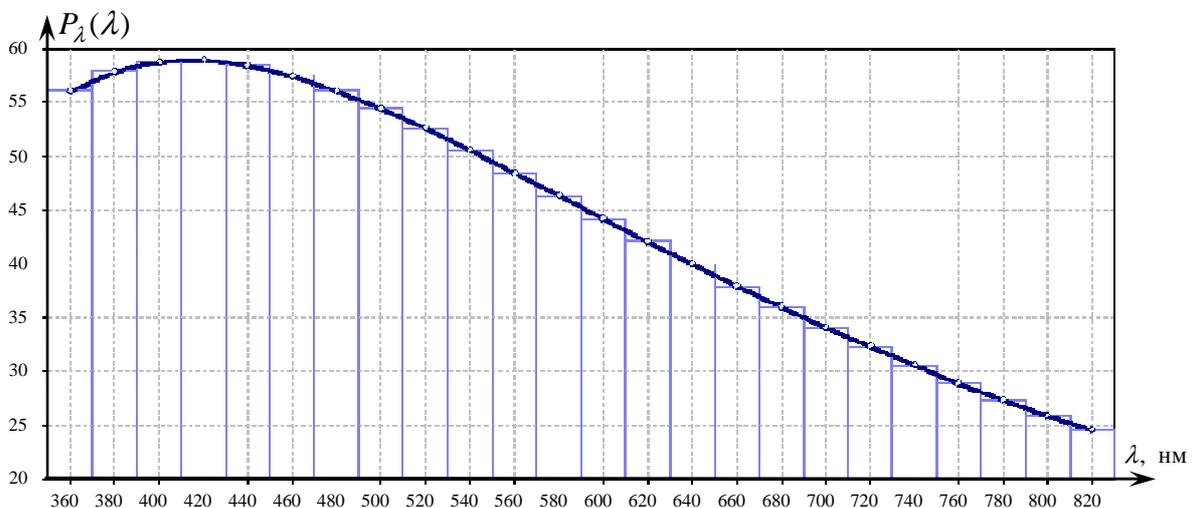


Рисунок 1.3 – Иллюстрация к примеру расчета

Расчёт координат цвета \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} в цветовом пространстве МКО 1931 г. CIE XYZ будем проводить по способу взвешенных ординат.

Спектр излучения источника является широким и гладким, рационально выбрать интервал суммирования $\Delta\lambda = 20$ нм. По таблице значений кривых сложения (Приложение 1) находим значения $\bar{x}(\lambda_i)$, $\bar{y}(\lambda_i)$ и $\bar{z}(\lambda_i)$ для всего диапазона значений длин волн с определённым $\Delta\lambda$. По графику функции (рис. 1.3) находим значения спектрального распределения излучения источника $P_\lambda(\lambda_i)$ для определенных длин волн λ_i .

Далее для каждой длины волны λ_i рассчитываем значения произведений $P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i)$, $P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i)$ и $P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i)$. Полученные значения приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные для проведения расчёта цветовых параметров источника излучения

λ_i	$P_\lambda(\lambda_i)$	$\bar{x}(\lambda_i)$	$\bar{y}(\lambda_i)$	$\bar{z}(\lambda_i)$	$P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i)$	$P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i)$	$P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i)$
360	56,12	0,000130	0,000004	0,000606	0,00729	0,00022	0,03401
380	57,92	0,001368	0,000039	0,006450	0,07923	0,00226	0,37355
400	58,82	0,014310	0,000396	0,067850	0,84176	0,02329	3,99117
420	58,97	0,134380	0,004000	0,645600	7,92482	0,23589	38,07310
440	58,50	0,348280	0,023000	1,747060	20,37304	1,34541	102,19629
460	57,52	0,290800	0,060000	1,669200	16,72578	3,45099	96,00642
480	56,15	0,095640	0,139020	0,812950	5,36978	7,80538	45,64366
500	54,48	0,004900	0,323000	0,272000	0,26696	17,59745	14,81891
520	52,61	0,063270	0,710000	0,078250	3,32836	37,35003	4,11639
540	50,59	0,290400	0,954000	0,020300	14,69062	48,26051	1,02693
560	48,48	0,594500	0,995000	0,003900	28,82306	48,24044	0,18908
580	46,34	0,916300	0,870000	0,001650	42,45818	40,31280	0,07646
600	44,18	1,062200	0,631000	0,000800	46,93230	27,88014	0,03535
620	42,05	0,854450	0,381000	0,000190	35,93202	16,02212	0,00799
640	39,96	0,447900	0,175000	0,000020	17,89971	6,99364	0,00080
660	37,93	0,164900	0,061000	0,000000	6,25498	2,31385	0,00000
680	35,97	0,046770	0,017000	0,000000	1,68226	0,61147	0,00000
700	34,08	0,011359	0,004102	0,000000	0,38714	0,13980	0,00000
720	32,27	0,002899	0,001047	0,000000	0,09357	0,03379	0,00000
740	30,55	0,000690	0,000249	0,000000	0,02108	0,00761	0,00000
760	28,91	0,000166	0,000060	0,000000	0,00480	0,00173	0,00000
780	27,36	0,000042	0,000015	0,000000	0,00114	0,00041	0,00000
800	25,88	0,000010	0,000004	0,000000	0,00027	0,00010	0,00000
820	24,49	0,000003	0,000001	0,000000	0,00006	0,00002	0,00000
$\Delta\lambda = 20$				$\sum_{i=1}^N$	5001,96	5172,59	6131,80

Определяем значения сумм

$$\sum_{i=1}^n P_\lambda(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \Delta\lambda = 5001,96$$

$$\sum_{i=1}^n P_\lambda(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda = 5172,59.$$

$$\sum_{i=1}^n P_\lambda(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \Delta\lambda = 6131,80$$

Рассчитываем коэффициент k_c по формуле (1.4):

$$k_c = 0,01933.$$

По соотношениям (1.3) определяем значения координат цвета

$$\bar{x} = 96,7$$

$$\bar{y} = 100 \quad .$$

$$\bar{z} = 118,54$$

Расчёт координат цветностей x и y на цветовой диаграмме МКО 1931 г. По формулам (1.6) получаем следующие значения

$$x = 0,30675$$

$$y = 0,31721$$

Расчёт координат цвета L , u' и v' в цветовом пространстве МКО 1976 г. $Lu'v'$. При использовании соотношений (1.7) и (1.8) можно получить одинаковые результаты:

$$L = 100$$

$$u' = 0,19812.$$

$$v' = 0,46099$$

Расчёт координат цвета L^* , a^* и b^* в цветовом пространстве МКО 2003 г. $L^*a^*b^*$. Координаты цвета источника типа $D50$ приведены в Приложении 3. По правилам (1.9) рассчитываем значения параметров $f(x)$, $f(y)$ и $f(z)$, и получаем:

$$f(x) = 1,00096$$

$$f(y) = 1 \quad .$$

$$f(z) = 1,12834$$

Далее, по формулам (1.10) находим значения координат цвета:

$$L^* = 100$$

$$a^* = 0,4825.$$

$$b^* = -25,67$$

Расчёт координат цвета L^* , u^* и v^* в цветовом пространстве МКО 1976 г. $L^*u^*v^*$. Возьмём в качестве точки белого источник типа E (координаты цвета источника приведены в Приложении 3). По формулам (1.7) рассчитываем и получаем значения

$$u'_w = 0,21053$$

$$v'_w = 0,47368$$

Исходя из соотношения (1.11) находим значение

$$f(\bar{y}/\bar{y}_w) = 1.$$

Далее, используя рассчитанные ранее значения $u' = 0,19812$ и $v' = 0,46099$, можно определить координаты цвета L^* , u^* и v^* заданного источника по формулам (1.12):

$$L^* = 100$$

$$u^* = -16,12.$$

$$v^* = -16,51$$

Расчёт координат цвета L , C_{ab} и H_{ab} в цветовом пространстве МКО 1976 г. $LC_{ab}H_{ab}$. Ранее были найдены значения $L^* = 100$, $a^* = 0,4825$ и $b^* = 25,67$. По соотношениям (1.13) получаем значения координат цвета

$$L = 100$$

$$C_{ab} = 25,67 \quad .$$

$$H_{ab} = 271,08^\circ$$

Расчёт координат цвета L , C_{uv} и H_{uv} в цветовом пространстве МКО 1976 г. $LC_{uv}H_{uv}$. Ранее были найдены значения $L^* = 100$, $u^* = -16,12$ и $v^* = -16,51$. По формулам (1.14) рассчитываем значения координат цвета

$$L = 100$$

$$C_{uv} = 23,07 \quad .$$

$$H_{uv} = 225,68^\circ$$

1.9 Вопросы для самопроверки

- В чем разница между цветовыми координатами и координатами цветностей?
- Чем отличается способ избранных ординат от способа взвешенных ординат?
- Каковы ограничения использования способа взвешенных ординат?
- Какие значения может принимать цветовая координата \bar{u} при анализе источников излучения?
- Можно ли для определения цветовых координат излучения источника использовать относительное спектральное распределение излучения данного источника?
- Каковы критерии выбора интервала $\Delta\lambda$ при использовании способа взвешенных ординат или способа избранных ординат?

2 ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА. КОРРЕЛИРОВАННАЯ ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Белый свет имеет особые цветовые характеристики. Существует много оптических спектров излучения, при помощи которых можно создать излучение белого цвета. Среди этих спектров можно выделить спектр излучения абсолютно чёрного тела, часто называемого излучением Планка. Данный спектр лежит в основе однозначного и очень полезного стандарта, позволяющего описывать спектр излучения при помощи одного единственного параметра – цветовой температуры. Более того, спектр излучения естественного дневного света близок к спектру планковского источника излучения.

2.1 Спектр излучения Солнца

Белый свет, как правило, характеризуется широким спектром излучения, который обычно распространяется на весь видимый диапазон длин волн.

Типичной моделью белого света является солнечный свет. На рис. 2.1 показаны оптические спектры Солнца в верхних слоях земной атмосферы и на уровне моря в моменты нахождения Солнца в зените, на закате и на рассвете. Спектр солнечного света занимает весь диапазон видимого излучения. Однако интенсивность солнечного излучения зависит от времени суток, времени года, высоты над уровнем моря, погоды и других факторов [11 – 14].

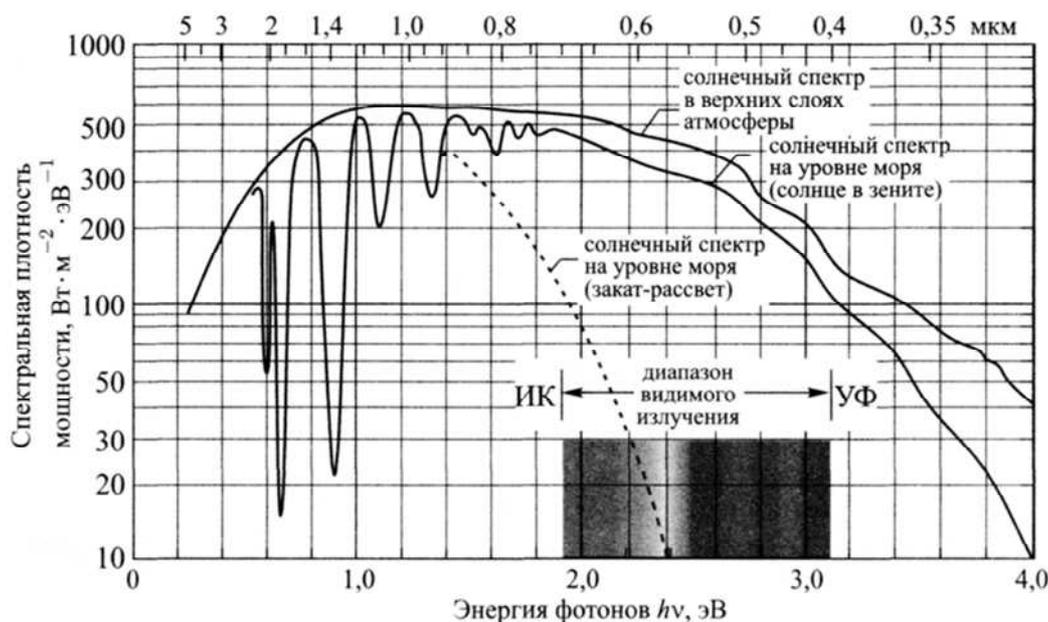


Рисунок 2.1 – Зависимость спектральной плотности мощности солнечного излучения от энергии фотонов и длины волны, измеренные в разных условиях

Поскольку в солнечном свете велика доля инфракрасной (ИК) и ультрафиолетовой (УФ) составляющих, при точном повторении спектра излучения Солнца не удастся получить эффективный источник белого света. Поэтому Солнце не является хорошим примером эффективного источника белого света. Даже если бы удалось исключить из спектра Солнца ИК- и УФ-составляющие, его все равно нельзя было бы назвать оптимальным из-за высокой интенсивности излучения на границах раздела видимый свет – ИК-излучение и видимый свет – УФ-излучение.

2.2 Спектр излучения абсолютно чёрного тела

В качестве независимого стандарта, характеризующего белый свет, часто используют спектр излучения абсолютно чёрного тела, определяемый только одним параметром – температурой излучающего тела. Первым формулу, описывающую спектральную плотность светимости чёрного тела с заданной температурой, вывел Макс Планк в 1900 г.:

$$M(\lambda) = \frac{2h \cdot c^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}, \quad (2.1)$$

где λ – длина волны, c – скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с), h – постоянная Планка ($h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ Дж·с), k – постоянная Больцмана ($k = 1,38067 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T – температура излучателя в градусах Кельвина.

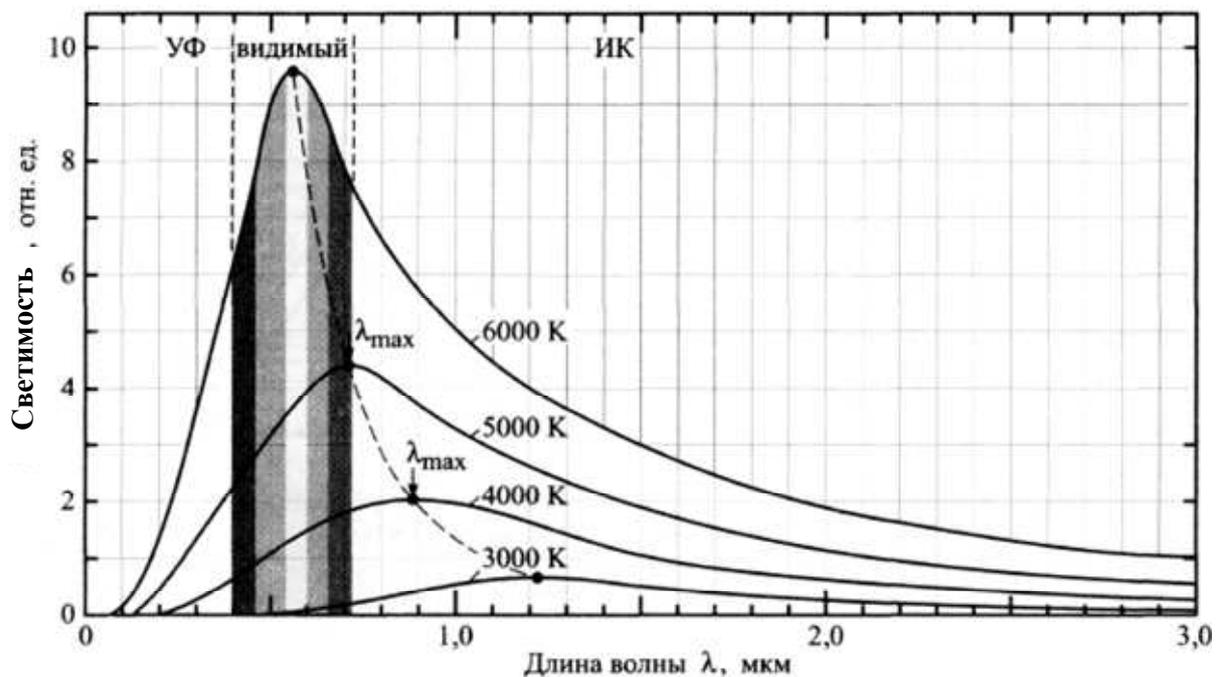


Рисунок 2.2 – Спектральные распределения интенсивности излучения абсолютно чёрного тела по длинам волн, измеренные при разных температурах.

На рис. 2.2 представлены спектры излучения абсолютно чёрного тела при разных температурах. Длина волны, соответствующая максимальной интенсивности излучения, испускаемого чёрным телом с заданной температурой, может быть рассчитана исходя из закона Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T}.$$

При «низких» температурах чёрного тела (например, 3000 К) излучение происходит в основном в ИК-диапазоне длин волн. По мере увеличения температуры максимум излучения смещается в сторону более коротких волн, т.е. в сторону видимого диапазона спектра.

На рис. 2.3 показано расположение на цветовой диаграмме МКО 1931 г. спектра излучения чёрного тела, который часто называют линией цветности абсолютно черного тела или кривой Планка. С ростом температуры чёрного тела положение его излучения на диаграмме сдвигается из области красных волн ближе к центру диаграммы.

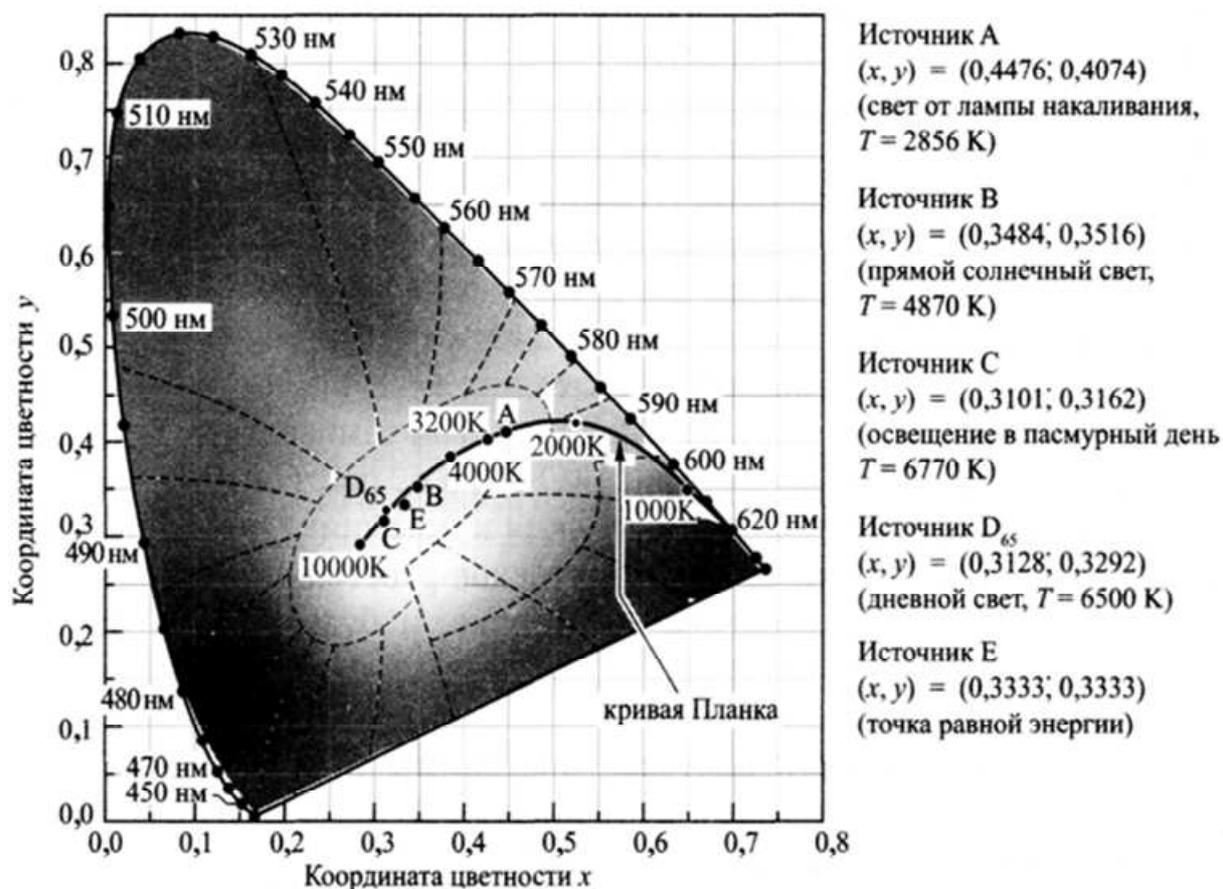


Рисунок 2.3 – Цветовая диаграмма, на которой показаны кривая Планка и положение стандартных источников излучения белого света А, В, С и D_{65}

Температура чёрного тела, излучающего белый свет, обычно лежит в диапазоне 2500–10000 К. На рис. 2.3 также показано расположение на

цветовой диаграмме нескольких стандартных источников излучения, определенных МКО: A , B , C и D_{65} .

На рис. 2.4 представлены кривая Планка и различные значения температуры абсолютно черного тела на равноконтрастной цветовой диаграмме МКО 1976 г.

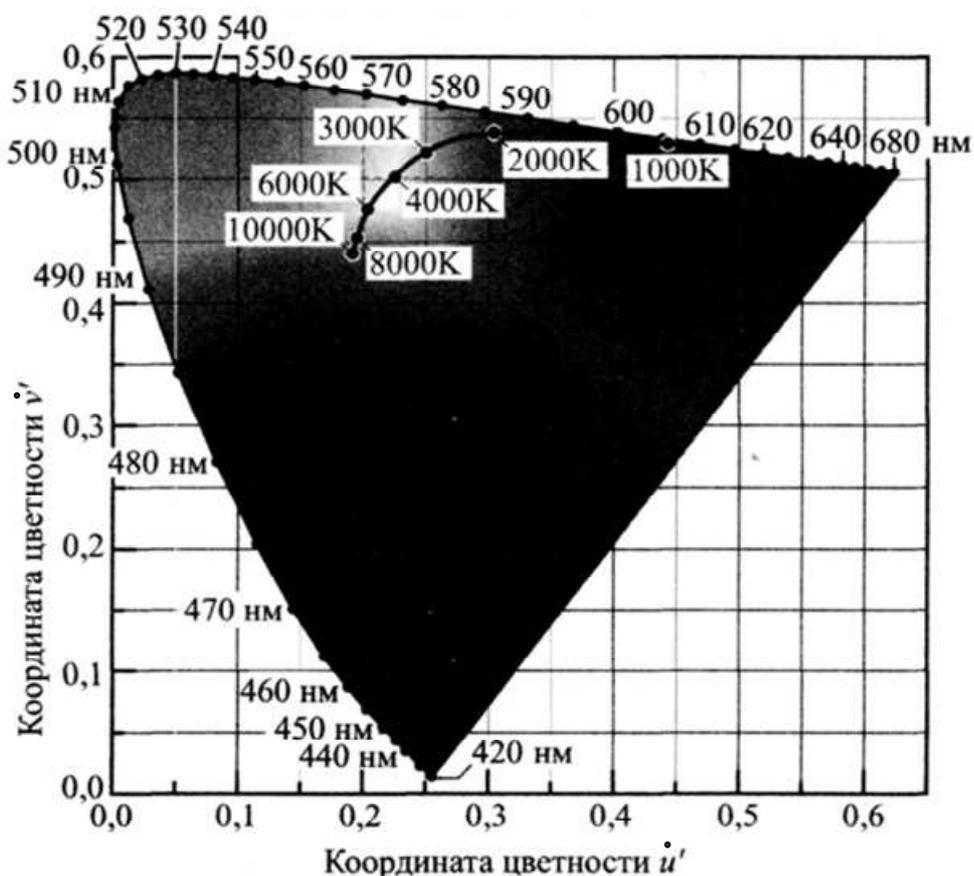


Рисунок 2.4 – Кривая Планка на равноконтрастной цветовой диаграмме МКО 1976 г.

Координаты цветностей (u', v') абсолютно чёрного тела – излучателя Планка для различных значений цветовых температур в миредах приведены в приложениях (Приложение 2).

2.3 Коррелированная цветовая температура

С первого взгляда цветовая температура может показаться весьма странной величиной, поскольку параметры цвет и температура не имеют прямого отношения друг к другу [15, 16]. Однако, проанализировав поведение абсолютно чёрного тела, невозможно не увидеть взаимосвязь между этими параметрами. С ростом температуры цвет свечения чёрного тела меняется от красного до голубовато-белого (красный – оранжевый – жёлтовато-белый – белый – голубовато-белый). Цветовая температура (ЦТ)

T_c источника белого света, измеряемая в кельвинах, определяется температурой абсолютно чёрного тела, расположенного на цветовой диаграмме там же, где и рассматриваемый источник излучения.

Если источник белого света не попадает на кривую Планка, для его описания используется коррелированная цветовая температура (КЦТ) T'_c . Эта величина также измеряется в Кельвинах и определяется температурой абсолютно чёрного тела, цвет которого максимально приближен к цвету источника белого света.

Для нахождения КЦТ источника излучения на цветовой диаграмме МКО 1976 г., построенной в координатах (u', v') , определяется самая близкая к источнику точка на кривой Планка (т.е. самое короткое геометрическое расстояние). Температура чёрного тела, расположенного в этой точке, и будет соответствовать КЦТ рассматриваемого источника.

Из-за неравномерности цветовой диаграммы МКО 1931 г., по ней невозможно определить коррелированную цветовую температуру, используя приведенный выше алгоритм. Для нахождения коррелированной цветовой температуры T'_c по цветовой диаграмме МКО 1931 г. на неё необходимо нанести линии, соответствующие постоянным значениям коррелированной цветовой температуры, что и показано на рис. 2.5.

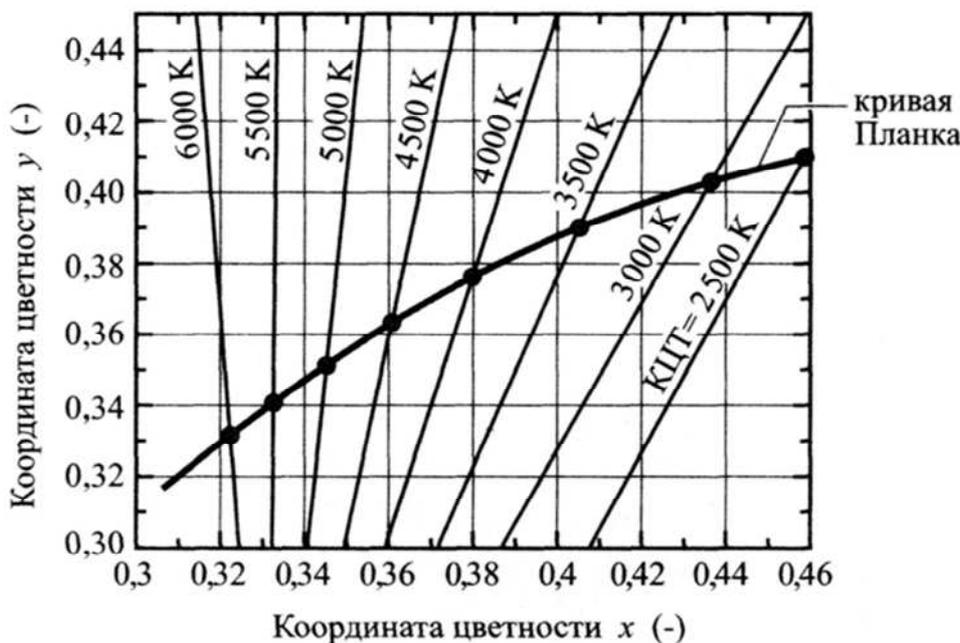


Рисунок 2.5 – Цветовая диаграмма МКО 1931 г., на которую нанесены изотермические линии (линии постоянных значений КЦТ T'_c)

Координаты цветности ламп накаливания на цветовой диаграмме близки к координатам абсолютно чёрного тела, хотя полного совпадения нет. Поэтому для таких источников цветовая температура определяется довольно точно.

Цветовые температуры стандартных ламп накаливания лежат в диапазоне от 2000 до 2900 градусов К, а кварцевых галогенных ламп – в диапазоне от 2800 до 3200 градусов К.

Другие источники излучения, такие как металлогалогенные лампы, на цветовой диаграмме заметно удалены от кривой Планка. Поэтому для них надо определять коррелированную цветовую температуру. Например, коррелированная цветовая температура для лампы голубовато-белого цвета составляет примерно 8000 градусов К. В таблице 2.1 приведены значения коррелированной цветовой температуры наиболее распространенных источников искусственного и естественного света.

Таблица 2.1 – Коррелированная цветовая температура наиболее распространенных источников искусственного и естественного света

Источник света	Коррелированная цветовая температура T'_c , К
Пламя восковой свечи / пламя стандартной свечи	1500 – 2000 / 2000
Лампа накаливания 60 Вт / 100 Вт	2800 / 2850
Галогенная лампа	2800 – 3200
Флуоресцентная лампа «тёплого белого» света	3000
Флуоресцентная лампа «холодного дневного белого» света	4300
Флуоресцентная лампа «реального дневного» света (с выравниванием цвета)	6500
Белое пламя углеродной дуги	5000
Ксеноновая дуга (не фильтрованная)	6000
Летний солнечный свет (от 9:00 или после 15:00)	4900 – 5600
Летний солнечный свет (с 9:00 до 15:00)	5400 – 5700
Прямое солнце	5700 – 6500
Солнце сквозь облака	6500 – 7200
Ясное голубое небо	8000 – 27000

2.4 Расчет коррелированной цветовой температуры

Значение коррелированной цветовой температуры источника T'_c излучения можно найти из формулы [17]:

$$T'_c = T_{c1} + d_1 \cdot \frac{T_{c2} - T_{c1}}{d_1 - d_2}, \quad (2.2)$$

где T_{c1} и T_{c2} – значения цветовых температур излучателя Планка ближайших изотермических линий к точке, характеризующей исследуемый

источник излучения (см. Приложение 2), а d_1 и d_2 – расстояния до указанных изотермических линий соответственно.

d_1 и d_2 можно рассчитать по следующим формулам:

$$d_j = \frac{(\dot{v}' - \dot{v}'_{0j}) - t_j \cdot (\dot{u}' - \dot{u}'_{0j})}{\sqrt{1 + t_j^2}}, \quad (2.3)$$

где (\dot{u}', \dot{v}') – координаты цвета исследуемого источника в специализированном цветовом пространстве $Li'\dot{v}'$, которые рассчитываются по формулам [8, 17, 18]:

$$\begin{aligned} \dot{u}' &= \frac{4\bar{x}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}; \\ \dot{v}' &= \frac{6\bar{y}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

значения u'_0 , v'_0 и t можно найти в Приложении 2.

Цветовое пространство $Li'\dot{v}'$ отличается тем, что в нем изотермические линии, характеризующие излучения излучателей Планка, расположены равномерно.

Рассчитанное по формуле (2.2) значение цветовой температуры получится в миредах – единицах измерения, обратных градусам Кельвина. Чтобы получить значение коррелированной цветовой температуры в градусах Кельвина, необходимо пересчитать получившееся значение по следующей формуле

$$T'_c [^\circ\text{K}] = \frac{10^6}{T'_c [\mu]}.$$

2.5 Пример расчёта коррелированной цветовой температуры для заданного источника излучения

Рассмотрим заданный источник излучения из раздела 1.8, имеющий следующие координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г. XYZ:

$$\bar{x} = 96,7$$

$$\bar{y} = 100$$

$$\bar{z} = 118,54$$

Координаты цвета в цветовом пространстве $Li'\dot{v}'$ для указанного источника излучения рассчитываются по формулам (2.4) и имеют следующие значения:

$$\dot{u}' = 0,19812$$

$$\dot{v}' = 0,30732$$

Далее для набора изотермических линий (см. Приложение 2) по формуле (2.3) рассчитываем значения расстояний от точки, характеризующей заданный источник, до каждой изотермической линии из представленного набора. Результаты расчётов приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Пример расчета расстояний d_j

T_c, μ	u'_0	v'_0	t	d
0	0,18006	0,26352	-0,24341	0,046834
10	0,18066	0,26589	-0,25479	0,044464
20	0,18133	0,26846	-0,26876	0,041892
30	0,18208	0,27119	-0,28539	0,03915
40	0,18293	0,27407	-0,3047	0,036239
50	0,18388	0,27709	-0,32675	0,033163
60	0,18494	0,28021	-0,35156	0,029953
70	0,18611	0,28342	-0,37915	0,026613
80	0,1874	0,28668	-0,40955	0,023169
90	0,1888	0,28997	-0,44278	0,019644
100	0,19032	0,29326	-0,47888	0,016056
125	0,19462	0,30141	-0,58204	0,006875
150	0,19962	0,30921	-0,70471	-0,00240
175	0,20525	0,31647	-0,84901	-0,01158
200	0,21142	0,32312	-1,0182	-0,02055
225	0,21807	0,32909	-1,2168	-0,02923
250	0,22511	0,33439	-1,4512	-0,03758
275	0,23247	0,33904	-1,7298	-0,04561
300	0,2401	0,34308	-2,0637	-0,05337
325	0,24792	0,34655	-2,4681	-0,06088
350	0,25591	0,34951	-2,9641	-0,06824
375	0,264	0,352	-3,5814	-0,07546
400	0,27218	0,35407	-4,3633	-0,08263
425	0,28039	0,35577	-5,3762	-0,08974
450	0,28863	0,35714	-6,7262	-0,09685
475	0,29685	0,35823	-8,5955	-0,10395
500	0,30505	0,35907	-11,324	-0,11106
525	0,3132	0,35968	-15,628	-0,11818
550	0,32129	0,36011	-23,325	-0,12531
575	0,32931	0,36038	-40,77	-0,13245
600	0,33724	0,36051	-116,45	-0,13957

Те изотермические линии, расстояния d к которым меняют знак с положительного значения на отрицательное, являются ближайшими. Пусть верхняя линия будет иметь индекс 1, а вторая – 2. Тогда имеем

$$d_1 = 0,006875$$

$$d_2 = -0,00240$$

и

$$T_{c1} = 125$$

$$T_{c2} = 150$$

Тогда по формуле (2.2) можно рассчитать значение коррелированной цветовой температуры источника T'_c в миредах

$$T'_c = 143,5255 [\mu].$$

При переводе из миред в градусы Кельвина получаем

$$T'_c = 6967 [^\circ\text{K}]$$

2.6 Вопросы для самопроверки

- Что такое миреды?
- Можно ли определить цветовую температуру излучения люминесцентной лампы?
- Чем отличается цветовая температура от коррелированной цветовой температуры?
- Что описывает формула Планка?
- Что описывает закон Вина?
- Что такое изотермическая линия и где она находится?
- Что такое кривая Планка и как она связана с формулой Планка?
- Имеет ли смысл рассчитывать цветовую температуру или коррелированную цветовую температуру для светодиода с узким спектром излучения?
- Методика расчета коррелированной цветовой температуры.
- Можно ли рассчитать коррелированную цветовую температуру при помощи координат цветностей (x, y) ? Если можно, то как?
- Почему у ясного голубого неба такой большой диапазон изменения коррелированной цветовой температуры?
- Изменяется ли коррелированная температура солнечного излучения в течение дня? Если да, то как и почему?

3 ПЕРЕСЧЕТ МЕЖДУ ЦВЕТОВЫМИ КООРДИНАТНЫМИ ПРОСТРАНСТВАМИ. КОЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ

В данном разделе практических занятий рассмотрим пересчет из цветового пространства МКО 1931 г. СIE XYZ в цветовое пространство RGB. Указанный пересчет проводится в два основных этапа

1. преобразование из цветового пространства XYZ в линейное пространство R'G'B';
2. преобразование из линейного пространства R'G'B' в нелинейное пространство RGB.

Рассмотрим подробнее эти этапы.

3.1 Преобразование из XYZ в линейное пространство R'G'B'

Координаты цвета в линейном пространстве RGB $(\bar{r}', \bar{g}', \bar{b}')$ можно рассчитать по следующему соотношению [10]:

$$\begin{bmatrix} \bar{r}' \\ \bar{g}' \\ \bar{b}' \end{bmatrix} = [M]^{-1} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

где \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} – координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г. СIE XYZ, а $[M]^{-1}$ – обратная (инверсная) матрица пересчета M .

3.1.1 Расчёт прямой матрицы пересчета

Прямая матрица пересчета определяется по формуле:

$$[M] = \begin{bmatrix} S_r \bar{x}_r & S_g \bar{x}_g & S_b \bar{x}_b \\ S_r \bar{y}_r & S_g \bar{y}_g & S_b \bar{y}_b \\ S_r \bar{z}_r & S_g \bar{z}_g & S_b \bar{z}_b \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

где $(\bar{x}_r, \bar{y}_r, \bar{z}_r)$, $(\bar{x}_g, \bar{y}_g, \bar{z}_g)$ и $(\bar{x}_b, \bar{y}_b, \bar{z}_b)$ – координаты цвета (в цветовом пространстве МКО 1931 г. СIE XYZ) основных цветов в используемом типе цветового пространства RGB, которые могут быть рассчитаны по известным координатам цветностей (x_r, y_r) , (x_g, y_g) и (x_b, y_b) (см. Приложение 4); S_r , S_g и S_b – коэффициенты пересчета для красного, зеленого и синего каналов [10].

Значения координат цвета основных цветов рассчитываются следующим образом

$$\begin{aligned}
\bar{x}_r &= \frac{x_r}{y_r} & \bar{x}_g &= \frac{x_g}{y_g} & \bar{x}_b &= \frac{x_b}{y_b} \\
\bar{y}_r &= 1 & \bar{y}_g &= 1 & \bar{y}_b &= 1 \\
\bar{z}_r &= \frac{(1-x_r-y_r)}{y_r} & \bar{z}_g &= \frac{(1-x_g-y_g)}{y_g} & \bar{z}_b &= \frac{(1-x_b-y_b)}{y_b}
\end{aligned} \quad (3.3)$$

Значения коэффициентов пересчета для красного, зеленого и синего каналов S_r , S_g и S_b можно определить по следующему выражению

$$\begin{bmatrix} S_r \\ S_g \\ S_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_r & \bar{x}_g & \bar{x}_b \\ \bar{y}_r & \bar{y}_g & \bar{y}_b \\ \bar{z}_r & \bar{z}_g & \bar{z}_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{x}_W \\ \bar{y}_W \\ \bar{z}_W \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

где $(\bar{x}_r, \bar{y}_r, \bar{z}_r)$, $(\bar{x}_g, \bar{y}_g, \bar{z}_g)$ и $(\bar{x}_b, \bar{y}_b, \bar{z}_b)$ – рассчитанные ранее по формулам (3.3) координаты цвета основных цветов в используемом типе цветового пространства, а $(\bar{x}_W, \bar{y}_W, \bar{z}_W)$ – координаты цвета точки белого в используемом типе цветового пространства (см. Приложение 3 и Приложение 4)

3.1.2 Колориметрическая коррекция

Колориметрическая коррекция применяется для преобразования исходных координат цвета $(\bar{x}_p, \bar{y}_p, \bar{z}_p)$ пространства с координатами цвета точки белого $(\bar{x}_{Wp}, \bar{y}_{Wp}, \bar{z}_{Wp})$ в требуемые координаты $(\bar{x}_d, \bar{y}_d, \bar{z}_d)$ с координатами цвета точки белого $(\bar{x}_{Wd}, \bar{y}_{Wd}, \bar{z}_{Wd})$ [10].

То есть данная коррекция должна проводиться тогда и только тогда, когда точка белого в пространстве, из которого производится пересчет, и точка белого в пространстве, в которое производится пересчет, не совпадают.

Основная формула преобразования имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_d \\ \bar{y}_d \\ \bar{z}_d \end{bmatrix} = [M_c] \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_p \\ \bar{y}_p \\ \bar{z}_p \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

где $[M_c]$ – коррекционная матрица, рассчитываемая по соотношению

$$[M_c] = [M_A]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mu_d/\mu_p & 0 & 0 \\ 0 & \xi_d/\xi_p & 0 \\ 0 & 0 & \psi_d/\psi_p \end{bmatrix} \cdot [M_A], \quad (3.6)$$

где $[M_A]^{-1}$ – инверсированная матрица коррекции $[M_A]$ (в Приложении 5 представлены матрицы колориметрической коррекции для различных методов – XYZ Scaling, Bradford и Von Kries – расчет проводится по одному из указанных методов – считается, что методы Bradford и Von Kries являются наиболее точными), а (μ_p, ξ_p, ψ_p) и (μ_d, ξ_d, ψ_d) – вектора коррекции исходного цветового пространства и требуемого цветового пространства.

Вектора коррекции исходного пространства (μ_p, ξ_p, ψ_p) и требуемого пространства (μ_d, ξ_d, ψ_d) рассчитываются по следующим выражениям

$$\begin{bmatrix} \mu_p \\ \xi_p \\ \psi_p \end{bmatrix} = [M_A] \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_{Wp} \\ \bar{y}_{Wp} \\ \bar{z}_{Wp} \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} \mu_d \\ \xi_d \\ \psi_d \end{bmatrix} = [M_A] \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_{Wd} \\ \bar{y}_{Wd} \\ \bar{z}_{Wd} \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

3.2 Преобразование из линейного пространства $R'G'B'$ в нелинейное RGB

Данное преобразование зависит от вида цветового пространства RGB, в которое необходимо пересчитать цветовые координаты XYZ. Преобразования можно совершать при помощи [10]

- гамма преобразования,
- sRGB преобразования и
- яркостного преобразования.

Рассмотрим данные преобразования подробнее.

3.2.1 Гамма преобразование

Гамма преобразование производится для тех цветовых пространств RGB, для которых задано значение параметра γ (см. Приложение 4). При этом цветовые координаты RGB рассчитываются по соотношениям

$$\begin{aligned} \bar{r} &= (\bar{r}')^{1/\gamma} \\ \bar{g} &= (\bar{g}')^{1/\gamma}, \\ \bar{b} &= (\bar{b}')^{1/\gamma} \end{aligned} \quad (3.9)$$

где γ – множитель, определённый для большинства типов цветовых пространств RGB. Необходимо помнить, что полученные цветовые

координаты $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ будут нормированы к единице. Чтобы получить привычные значения цветовых координат $[0, 255]$, полученные значения $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ следует умножить на 255.

3.2.2 sRGB преобразование

Данное преобразование производится только для цветового пространства sRGB. При этом цветовые координаты в данном цветовом пространстве рассчитываются по следующим выражениям

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \begin{cases} 12,92 \cdot \bar{r}' & \text{при } \bar{r}' \leq 0,0031308 \\ 1,055 \cdot (\bar{r}')^{1/2,4} - 0,055 & \text{при } \bar{r}' > 0,0031308 \end{cases} \\ \bar{g} &= \begin{cases} 12,92 \cdot \bar{g}' & \text{при } \bar{g}' \leq 0,0031308 \\ 1,055 \cdot (\bar{g}')^{1/2,4} - 0,055 & \text{при } \bar{g}' > 0,0031308 \end{cases} \\ \bar{b} &= \begin{cases} 12,92 \cdot \bar{b}' & \text{при } \bar{b}' \leq 0,0031308 \\ 1,055 \cdot (\bar{b}')^{1/2,4} - 0,055 & \text{при } \bar{b}' > 0,0031308 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Необходимо помнить, что полученные цветовые координаты $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ будут нормированы к единице. Чтобы получить привычные значения цветовых координат $[0, 255]$, полученные значения $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ следует умножить на 255.

3.2.3 Яркостное преобразование

Данное преобразование производится только для цветового пространства ECI RGB v2. При этом цветовые координаты в данном цветовом пространстве рассчитываются по следующим выражениям

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \begin{cases} \frac{\bar{r}' \cdot \kappa}{100} & \text{при } \bar{r}' \leq \varepsilon \\ 1,16 \cdot (\bar{r}')^{1/3} - 0,16 & \text{при } \bar{r}' > \varepsilon \end{cases} \\ \bar{g} &= \begin{cases} \frac{\bar{g}' \cdot \kappa}{100} & \text{при } \bar{g}' \leq \varepsilon \\ 1,16 \cdot (\bar{g}')^{1/3} - 0,16 & \text{при } \bar{g}' > \varepsilon \end{cases} \\ \bar{b} &= \begin{cases} \frac{\bar{b}' \cdot \kappa}{100} & \text{при } \bar{b}' \leq \varepsilon \\ 1,16 \cdot (\bar{b}')^{1/3} - 0,16 & \text{при } \bar{b}' > \varepsilon \end{cases} \end{aligned} \quad (3.11)$$

где ε и κ – параметры, имеющие следующие значения

$$\varepsilon = \frac{216}{24389} = (0,008856),$$

$$\kappa = \frac{24389}{27} = 903,3.$$

Необходимо помнить, что полученные цветные координаты $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ будут нормированы к единице. Чтобы получить привычные значения цветных координат $[0,255]$, полученные значения $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ следует умножить на 255.

3.3 Алгоритм проведения пересчета XYZ – RGB

Последовательность проведения пересчета из цветового пространства XYZ в цветное пространство RGB представлена на рис. 3.1.

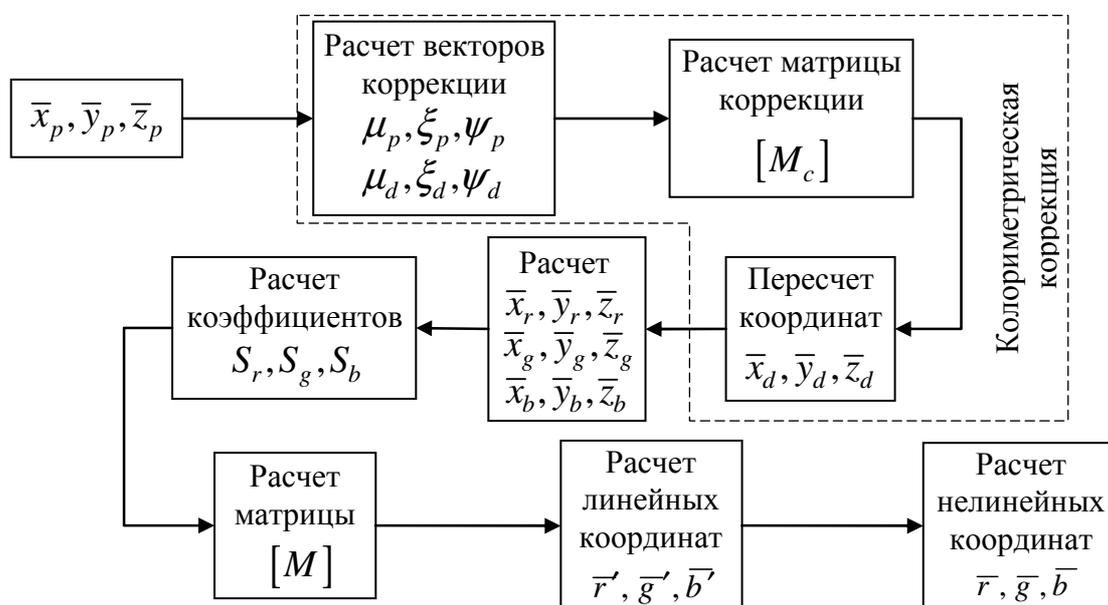


Рисунок 3.1 – Алгоритм пересчета XYZ – RGB

Таким образом, в самую первую очередь производится колориметрическая коррекция (при необходимости). При этом сначала рассчитываются вектора коррекции по формулам (3.7) и (3.8). Затем выбирается метод коррекции XYZ scaling, Bradford или Von Kries и проводится расчет матрицы коррекции $[M_c]$ по соотношению (3.6) и рассчитываются скорректированные значения цветных координат $(\bar{x}_d, \bar{y}_d, \bar{z}_d)$ по выражению (3.5).

Затем поэтапно проводится расчет координат цвета основных цветов в рассматриваемом типе цветового пространства RGB по соотношениям (3.3), расчет коэффициентов пересчета S_r , S_g и S_b по выражению (3.4),

расчет матрицы пересчета $[M]$ по формуле (3.2) и расчет координат в линейной системе RGB по соотношению (3.1).

Финальным является нелинейное преобразование по одному из представленных ранее выражений (3.9), (3.10) или (3.11) в зависимости от типа цветового пространства RGB, в которую необходимо произвести расчет.

3.4 Пример пересчёта цветовых координат

Необходимо пересчитать цветовые координаты источника излучения из раздела 1.8 в цветовом пространстве МКО 1931 г. СIE XYZ в координаты цветового пространства ProPhotoRGB. Исходные координаты источника:

$$\bar{x}_p = 96,70$$

$$\bar{y}_p = 100 \quad .$$

$$\bar{z}_p = 118,54$$

Цветовое пространство МКО 1931 г. СIE XYZ имеет точку белого (источник типа E) со следующими координатами:

$$\bar{x}_{wp} = 100$$

$$\bar{y}_{wp} = 100 \quad .$$

$$\bar{z}_{wp} = 100$$

Цветовое пространство ProPhotoRGB имеет точку белого (источник типа $D50$) с координатами (Приложение 3)

$$\bar{x}_{wd} = 96,422$$

$$\bar{y}_{wd} = 100 \quad .$$

$$\bar{z}_{wd} = 82,521$$

– Колориметрическая коррекция

Колориметрическую коррекцию будем проводить по методу Bradford, поэтому матрица коррекции $[M_A]$ имеет вид (Приложение 5):

$$[M_A] = \begin{bmatrix} 0,8951 & 0,2664 & -0,1614 \\ -0,7502 & 1,7135 & 0,0367 \\ 0,0389 & -0,0685 & 1,0296 \end{bmatrix} .$$

По формулам (3.7) и (3.8) получаем

$$\begin{bmatrix} \mu_p \\ \xi_p \\ \psi_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100,01 \\ 100 \\ 100 \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} \mu_d \\ \xi_d \\ \psi_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 99,62844 \\ 102,04274 \\ 81,86444 \end{bmatrix} .$$

По формуле (3.6) рассчитываем коррекционную матрицу $[M_c]$

$$[M_c] = \begin{bmatrix} 0,997755 & -0,00416 & -0,02937 \\ -0,00977 & 1,018317 & -0,00855 \\ -0,00742 & 0,013442 & 0,819185 \end{bmatrix}.$$

Затем по соотношению (3.5) получаем значения скорректированных цветовых координат заданного источника

$$\bar{x}_d = 92,58614$$

$$\bar{y}_d = 99,87369.$$

$$\bar{z}_d = 97,73660$$

– Расчет матрицы пересчета

По данным Приложения 4 получаем координаты цветов основных цветов цветового пространства ProPhotoRGB

$$x_r = 0,7347 \quad x_g = 0,1596 \quad x_b = 0,0366$$

$$y_r = 0,2653 \quad y_g = 0,8404 \quad y_b = 0,0001.$$

По формулам (3.3) получаем значения цветовых координат основных цветов пространства ProPhotoRGB

$$\bar{x}_r = 2,76932 \quad \bar{x}_g = 0,18991 \quad \bar{x}_b = 366$$

$$\bar{y}_r = 1 \quad \bar{y}_g = 1 \quad \bar{y}_b = 1.$$

$$\bar{z}_r = 0 \quad \bar{z}_g = 0 \quad \bar{z}_b = 9633$$

Значения коэффициентов пересчета для красного, зеленого и синего каналов рассчитываются по формуле (3.4)

$$S_r = 28,80402$$

$$S_g = 71,18741.$$

$$S_b = 0,0085665$$

Затем рассчитывается прямая матрица пересчета $[M]$ по соотношению (3.2)

$$[M] = \begin{bmatrix} 79,76749 & 13,51917 & 3,13534 \\ 28,80402 & 71,18741 & 0,00857 \\ 0 & 0 & 82,52100 \end{bmatrix}.$$

После этого можно рассчитать координаты цвета заданного источника в линейном пространстве ProPhotoRGB по формуле (3.1)

$$\bar{r}' = 0,94092$$

$$\bar{g}' = 1,02211.$$

$$\bar{b}' = 1,18438$$

– Преобразование в нелинейное пространство RGB

По данным Приложения 4 расчет итоговых значений цветовых координат в цветовом пространстве ProPhotoRGB осуществляется при помощи гамма преобразования. Величина

$$\gamma = 1,8.$$

По формуле (3.9) получаем

$$\bar{r} = 0,96673$$

$$\bar{g}' = 1,01222.$$

$$\bar{b}' = 1,09857$$

Чтобы получить более привычные значения цветовых координат, домножим полученные значения на 255:

$$\bar{r} = 247$$

$$\bar{g}' = 258.$$

$$\bar{b}' = 280$$

3.5 Вопросы для самопроверки

- Чем отличается матрица пересчета от матрицы колориметрической коррекции?
- Почему при расчете цветовых координат из пространства XYZ в выбранное пространство RGB, рассчитанные координаты Y основных цветов в выбранном типе цветового пространства RGB равны 1?
- Что такое множитель 255, используемый при пересчете в цветопространство RGB, и зачем он нужен?
- Последовательность алгоритма пересчета из пространства XYZ в пространство RGB.
- От чего зависит выбор метода пересчета из линейного пространства R'G'B' в нелинейное пространство RGB?
- Когда необходимо проводить колориметрическую коррекцию координат цвета?
- Чем гамма преобразование отличается от sRGB преобразования?
- В чем причина создания такой сложной методики пересчета цветовых координат из пространства XYZ в выбранное пространство RGB?
- Как вы думаете, почему существует так много цветовых пространств RGB? Каковы их общие черты и в чем они отличаются друг от друга?
- Методика расчета прямой матрицы пересчета из пространства XYZ в выбранное пространство RGB.
- Методика расчета матрицы колориметрической коррекции.

4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАЛЫХ ЦВЕТОВЫХ РАЗЛИЧИЙ

Методов расчета малых цветовых различий – более 100 различных вариантов (созданных для различных производств, красителей, контрольных источников излучения, условий и анализируемых областей цветности).

Рассмотрим пять возможных вариантов, которые МКО рекомендовала в различные года для экспериментальной проверки и практического применения.

Малые цветовые различия могут рассчитываться по следующим методикам:

– Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1950г.

– Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1976г.

– Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1994г.

– Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 2000г.

– Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям комитета по цветовым измерениям

4.1 Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1950 г.

Посредством криволинейного преобразования цветового пространства МКО 1931 г. CIE XYZ было разработано цветовое пространство $L^*a^*b^*$, для которого в 1950г. было рекомендовано определять малые цветовые различия между двумя сравниваемыми цветами по формуле [6, 19, 20]:

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}, \quad (4.1)$$

где (L_1^*, a_1^*, b_1^*) и (L_2^*, a_2^*, b_2^*) – цветовые координаты первого и второго из сравниваемых цветов соответственно в цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$, которые могут быть рассчитаны по формулам (1.9) и (1.10).

4.2 Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1976 г.

Посредством проективного преобразования цветового пространства МКО 1931 г. CIE XYZ было разработано цветовое пространство $L^*u^*v^*$, для

которого в 1976г. было рекомендовано определять малые цветовые различия между двумя сравниваемыми цветами по формуле [10, 8, 21]:

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (u_2^* - u_1^*)^2 + (v_2^* - v_1^*)^2}, \quad (4.2)$$

где (L_1^*, u_1^*, v_1^*) и (L_2^*, u_2^*, v_2^*) – цветовые координаты первого и второго из сравниваемых цветов соответственно в цветовом пространстве СIE $L^*u^*v^*$, которые могут быть рассчитаны по выражениям (1.11) и (1.12).

4.3 Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1994 г.

По данной методике рассчитываются малые цветовые различия между двумя сравниваемыми цветами на базе анализа координат цвета в цветовом пространстве СIE $L^*a^*b^*$.

При этом цветовая разность определяется выражением [10]:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H}\right)^2}, \quad (4.3)$$

где

$$\Delta L = L_1^* - L_2^*$$

$$\Delta C = C_1 - C_2 \quad , \text{при этом}$$

$$\Delta H = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 - \Delta C^2}$$

$$C_1 = \sqrt{(a_1^*)^2 + (b_1^*)^2},$$

$$C_2 = \sqrt{(a_2^*)^2 + (b_2^*)^2},$$

$$\Delta a = a_1^* - a_2^*,$$

$$\Delta b = b_1^* - b_2^*,$$

кроме того

$$\begin{cases} S_L = 1 \\ S_C = 1 + K_1 \cdot C_1 \\ S_H = 1 + K_2 \cdot C_1 \end{cases}$$

где

$$K_L = \begin{cases} 2 & \text{при анализе тканей} \\ 1 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$$K_C = 1 \quad ,$$

$$K_H = 1$$

а

$$K_1 = \begin{cases} 0,048 & \text{при анализе тканей} \\ 0,045 & \text{в остальных случаях} \end{cases},$$

$$K_2 = \begin{cases} 0,014 & \text{при анализе тканей} \\ 0,015 & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

4.4 Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 2000 г.

Подобно предыдущей, в данной методике рассчитываются малые цветовые различия между двумя сравниваемыми цветами на базе анализа координат цвета в цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$.

При этом цветовая разность определяется выражением [10]:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \cdot \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \cdot \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)}, \quad (4.4)$$

где

$$K_L = 1,$$

$$S_L = 1 + \frac{0,015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}},$$

при этом

$$\bar{L}' = \frac{L_1^* + L_2^*}{2}$$

и

$$\Delta L' = L_2^* - L_1^*.$$

Кроме того

$$K_C = 1,$$

$$S_C = 1 + 0,045\bar{C}',$$

где

$$\bar{C}' = \frac{C_1' + C_2'}{2},$$

при этом

$$C_1' = \sqrt{(a_1')^2 + (b_1^*)^2},$$

$$C_2' = \sqrt{(a_2')^2 + (b_2^*)^2},$$

где

$$a_1' = a_1^* \cdot (1 + G),$$

$$a_2' = a_2^* \cdot (1 + G).$$

При этом

$$G = \frac{\left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right)}{2},$$

где

$$\bar{C} = \frac{C_1 + C_2}{2},$$

при

$$C_1 = \sqrt{(a_1^*)^2 + (b_1^*)^2}, \quad C_2 = \sqrt{(a_2^*)^2 + (b_2^*)^2},$$

а

$$\Delta C' = C_2' - C_1'.$$

Также

$$K_H = 1, \quad S_H = 1 + 0,015\bar{C}'T,$$

где

$$T = 1 - 0,17 \cos(\bar{H}' - 30^\circ) + 0,24 \cos(2\bar{H}') + 0,32 \cos(3\bar{H}' + 6^\circ) - 0,20 \cos(4\bar{H}' - 63^\circ),$$

при

$$\bar{H}' = \begin{cases} \frac{h_1' + h_2' + 360^\circ}{2}, & |h_1' - h_2'| > 180^\circ \\ \frac{h_1' + h_2'}{2}, & |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ \end{cases}.$$

здесь h_1' и h_2' измеряются в угловой мере и рассчитываются по формулам:

$$h_1' = \begin{cases} \arctan\left(\frac{b_1^*}{a_1'}\right) & \text{при } a_1' > 0 \text{ и } b_1^* > 0 \\ \arctan\left(\frac{b_1^*}{a_1'}\right) + 360^\circ & \text{при } a_1' > 0 \text{ и } b_1^* < 0, \\ \arctan\left(\frac{b_1^*}{a_1'}\right) + 180^\circ & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$$h_2' = \begin{cases} \arctan\left(\frac{b_2^*}{a_2'}\right) & \text{при } a_2' > 0 \text{ и } b_2^* > 0 \\ \arctan\left(\frac{b_2^*}{a_2'}\right) + 360^\circ & \text{при } a_2' > 0 \text{ и } b_2^* < 0. \\ \arctan\left(\frac{b_2^*}{a_2'}\right) + 180^\circ & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Кроме того

$$\Delta H' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right),$$

где

$$\Delta h' = \begin{cases} h_2' - h_1' & |h_2' - h_1'| \leq 180^\circ \\ h_2' - h_1' + 360^\circ & |h_2' - h_1'| > 180^\circ; h_2' \leq h_1' \\ h_2' - h_1' - 360^\circ & |h_2' - h_1'| > 180^\circ; h_2' > h_1' \end{cases}$$

При этом

$$R_T = -R_C \sin(2\Delta\theta),$$

где

$$\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left(\frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25}\right)^2\right\}$$

а

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}}.$$

4.5 Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям комитета по цветовым измерениям

Подобно двум предыдущим, в данной методике рассчитываются малые цветовые различия между двумя сравниваемыми цветами на базе анализа координат цвета в цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$.

При этом цветовая разность определяется выражением [10]:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{lS_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{cS_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H}\right)^2}, \quad (4.5)$$

где (l, c) – координаты цветности в цветовом пространстве Lch , рассчитываемые по значениям координат в цветовом пространстве МКО 1976 г. $LC_{ab}H_{ab}$ или $LC_{uv}H_{uv}$ по соотношениям (1.13) или (1.14), при этом

$$l = L / 100,$$

а

$$c = C.$$

Однако в данном случае эти величины не рассчитываются, а используется один из двух вариантов сочетания $(l; c)$: при анализе воспроизведения цветовых оттенков (2;1) и при анализе восприятия цветовых оттенков (1;1).

Рассчитываются только такие параметры, как

$$\Delta L = L_1^* - L_2^*,$$

$$S_L = \begin{cases} 0,511 & L_1^* < 16 \\ \frac{0,040975L_1^*}{1+0,01765L_1^*} & L_1^* \geq 16 \end{cases},$$

и

$$\Delta C = C_1 - C_2,$$

где

$$C_1 = \sqrt{(a_1^*)^2 + (b_1^*)^2},$$

$$C_2 = \sqrt{(a_2^*)^2 + (b_2^*)^2},$$

а также

$$S_C = \frac{0,0638C_1}{1+0,0131C_1} + 0,638.$$

Кроме того

$$\Delta H = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta C^2},$$

где

$$\Delta a = a_1^* - a_2^*,$$

$$\Delta b = b_1^* - b_2^*$$

и

$$S_H = S_C (FT + 1 - F),$$

где

$$T = \begin{cases} 0,56 + |0,2 \cos(H_1 + 168)|, & \text{если } 164 \leq H_1 \leq 345 \\ 0,36 + |0,4 \cos(H_1 + 35)| & \end{cases},$$

$$F = \sqrt{\frac{C_1^4}{C_1^4 + 1900}}$$

и

$$H_1 = \begin{cases} \arctan\left(\frac{b_1^*}{a_1^*}\right) & \text{при } a_1^* > 0 \text{ и } b_1^* > 0 \\ \arctan\left(\frac{b_1^*}{a_1^*}\right) + 360^\circ & \text{при } a_1^* > 0 \text{ и } b_1^* < 0. \\ \arctan\left(\frac{b_1^*}{a_1^*}\right) + 180^\circ & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

4.6 Пример расчёта малых цветовых различий

Пусть необходимо рассчитать цветовое различие между цветом источника излучения из раздела 1.8 и цветом излучения источника Планка с цветовой температурой, равной по величине значению коррелированной цветовой температуры заданного источника из раздела 1.8.

Пусть заданный источник имеет индекс 1. Координаты цвета в цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$

$$L_1^* = 100$$

$$a_1^* = 0,4825.$$

$$b_1^* = -25,67$$

Координаты цвета в цветовом пространстве CIE $L^*u^*v^*$

$$L_1^* = 100$$

$$u_1^* = -16,12.$$

$$v_1^* = -16,51$$

Коррелированная цветовая температура заданного источника

$$T_c' = 6967.$$

По формуле (2.1) получаем спектр излучения источника Планка и по методике, изложенной в разделе 1 получаем координаты цвета в цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$:

$$L_2^* = 100$$

$$a_2^* = 0,4877.$$

$$b_2^* = -25,39$$

Координаты цвета в цветовом пространстве CIE $L^*u^*v^*$

$$L_2^* = 100$$

$$u_2^* = -15,94.$$

$$v_2^* = -16,11$$

– Расчёт малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1950г.

По формуле (4.1) получаем

$$\Delta E = 0,27623.$$

– Расчёт малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1976г.

По формуле (4.2) получаем

$$\Delta E = 0,43825$$

– Расчёт малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1994г.

По формуле (4.3) получаем
 $\Delta E = 0,12830$

– Расчёт малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 2000г.
По формуле (4.4) получаем
 $\Delta E = 0,13451$

– Расчёт малых цветовых различий по рекомендациям комитета по цветовым измерениям
По формуле (4.5) получаем
 $\Delta E = 0,14841$

4.7 Вопросы для самопроверки

- В чем отличие методики расчета малых цветовых различий по рекомендациям комитета по цветовым измерениям от всех остальных методик расчета малых цветовых различий?
- В чем отличие методики расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 2000 г. от всех остальных методик расчета малых цветовых различий?
- В чем отличие методики расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1994 г. от всех остальных методик расчета малых цветовых различий?
- В чем отличие методики расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1976 г. от всех остальных методик расчета малых цветовых различий?
- В чем отличие методики расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1950 г. от всех остальных методик расчета малых цветовых различий?
- Какие методики расчета малых цветовых различий основываются на применении цветовых координат в цветовом пространстве $L^*a^*b^*$?
- Какие методики расчета малых цветовых различий основываются на применении цветовых координат в цветовом пространстве $L^*u^*v^*$?
- Какие методики расчета малых цветовых различий основываются на применении цветовых координат в цветовом пространстве Lch ?
- В чем, по вашему мнению, состоит причина большого разнообразия методов расчета малых цветовых различий?
- Какой из представленных методов расчета малых цветовых различий наиболее эффективен для применения при анализе цветовых параметров источников излучения? Почему?
- Существует ли, по вашему мнению, оптимальный метод для расчета малых цветовых различий? Если да, то какой?

5 РАСЧЕТ ИНДЕКСА ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА КРИВОЙ ПЛАНКА

Оценка способности тестируемого источника излучения к передаче цветов производится его сравнением с эталонным источником света.

При экспериментальном определении индекса цветопередачи тестируемого источника помимо исследуемого и эталонного излучателей используют эталонные отражающие поверхности.

Однако с целью обеспечения международной стандартизации при определении коэффициентов цветопередачи реальных излучателей применяется специальный набор из 14 цветных поверхностей. Этот набор из 14 цветов был выбран из гораздо большего набора цветов, первоначально предложенного Манселлом.

5.1 Ограничения для проведения расчёта

По рекомендации МКО для проведения расчетов эталонный источник выбирается исходя из следующих соображений.

Если координаты цветности исследуемого источника лежат на кривой Планка, то эталонный источник должен быть абсолютно черным телом, имеющим ту же цветовую температуру, что и тестируемый излучатель.

В качестве эталонного, можно использовать один из стандартных источников МКО (например, D_{65}).

Идеальный случай – тестируемый и эталонный источники света имеют одинаковые координаты цветности и равные световые потоки.

Условились считать, что эталонный источник света обладает идеальными параметрами цветопередачи, т.е. его индекс цветопередачи $CRI = 100$. При этом исходили из того, что естественный дневной свет близок по параметрам к излучению абсолютно черного тела и поэтому по праву может быть отнесен к стандартным эталонным источникам света.

Эталонные отражающие поверхности, о которых упоминалось выше, определяются через их спектральную отражательную способность. На рис. 5.1 показаны спектры отражения восьми международных эталонов цвета, перечисленных в Приложении 6. Суммарный индекс цветопередачи вычисляется на основе измерений при использовании всех восьми эталонных поверхностей ($i = 1 - 8$).

Иногда для более детального изучения способности излучателей воспроизводить цвета применяют шесть дополнительных эталонных отражающих поверхностей (Приложение 7). Эти дополнительные поверхности характеризуются цветами: 9 – интенсивный красный, 10 – интенсивный желтый, 11 – интенсивный зеленый, 12 – фиолетово-синий, 13 – телесный цвет, 14 – цвет листьев на деревьях [14, 22].

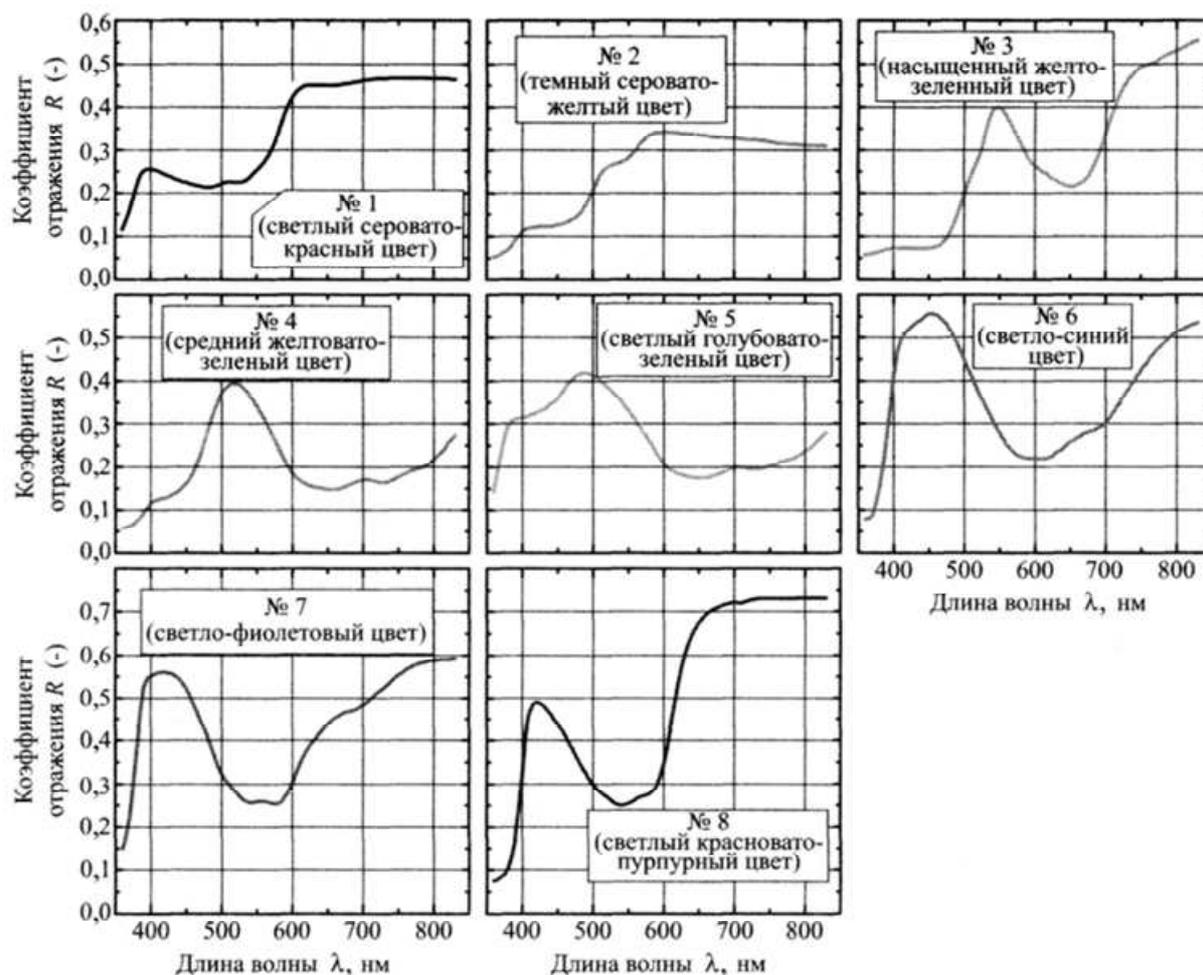


Рисунок 5.1 – Отражательная способность восьми эталонных цветowych поверхностей МКО

Спектры отражения шести дополнительных поверхностей с номерами 9-14 обладают более интенсивными цветами и сравнительно узкими пиками. Коэффициенты $CRI_9 - CRI_{14}$ называются частными индексами цветопередачи.

В качестве эталонного источника использовано абсолютно черное тело, ближе всего расположенное к точке с координатами цветности тестируемого источника. Следовательно, цветовая температура эталонного источника света равна коррелированной цветовой температуре испытуемого излучателя. В вычислениях индекса цветопередачи используются все четыре точки.

Однако следует отметить, что термин «цвет», используемый МКО, не совсем соответствует понятию «цветность». Более полное определение цвета МКО включает в себя такие характеристики, как тональность, насыщенность и яркость. Тональность и насыщенность определяются расположением точек на цветовой диаграмме, а для графического представления яркости объекта или излучателя необходимо вводить третью ось, что и показано на рис. 5.2 в качестве иллюстрации. Цветовая разность

физического объекта при его поочередном освещении эталонным и тестируемым источниками света, определяется разностями цветности и яркости, соответствующими геометрическим расстояниям между двумя точками на рис. 5.2. Такое представление цветности не является стандартом МКО и приведено здесь лишь с познавательной целью.

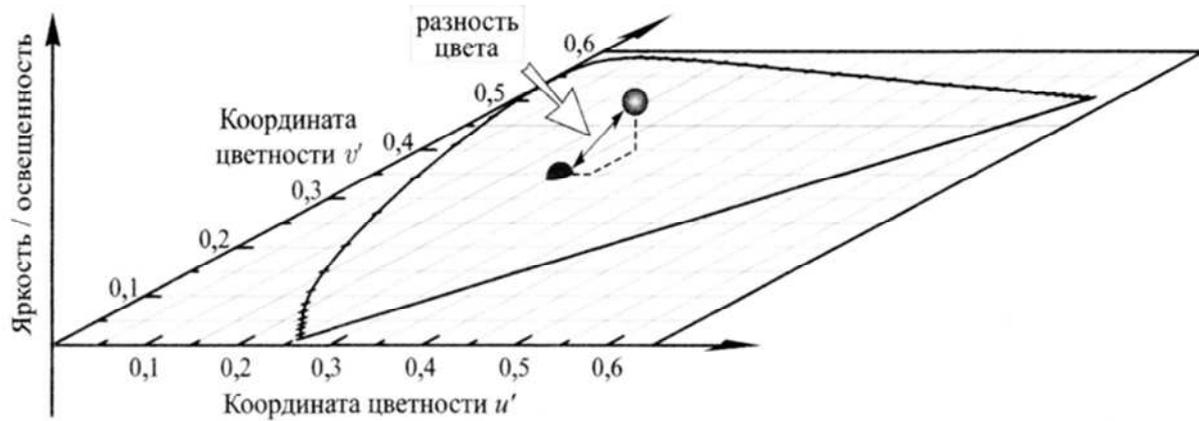


Рисунок 5.2 – Цветовая разность в трёхмерном цветовом пространстве.

Введение МКО понятия универсального цветового пространства было продиктовано необходимостью количественной оценки цвета с учетом характеристик цветности и яркости. Универсальное цветовое пространство должно обеспечивать прямую пропорциональность между цветовой разностью двух точек и геометрическим расстоянием между ними. Это значит, что цветовая разность в таком универсальном цветовом пространстве однозначно определяется расстоянием между двумя точками в нем. Универсальное цветовое пространство особенно подходит для количественной оценки цветовой разности.

5.2 Расчёт цветовых координат $L^*u^*v^*$

Данный расчет справедлив для излучателей, расположенных либо непосредственно на кривой Планка, либо на очень небольшом расстоянии от нее.

Значения координат цветового пространства $L^*u^*v^*$, определяющие цветовую разность эталонной поверхности и эталонного излучателя, находятся из следующих соотношений [14]:

$$\begin{aligned}
 L_i^{*ref} &= 116 \left(\frac{\bar{y}_i^{ref}}{\bar{y}^{ref}} \right)^{1/3} - 16 \\
 u_i^{*ref} &= 13 \cdot L_i^{*ref} \cdot (u_i'^{ref} - u'^{ref}), \\
 v_i^{*ref} &= 13 \cdot L_i^{*ref} (v_i'^{ref} - v'^{ref})
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

где значения координат \bar{y}_i^{ref} , u_i^{ref} и v_i^{ref} описывают цвет i -той эталонной поверхности при её освещении эталонным источником, а значения координат \bar{y}^{ref} , u^{ref} и v^{ref} – цвет излучения эталонного источника белого света.

Значения координат цветового пространства $L^*u^*v^*$, определяющие цветовую разность эталонной поверхности и тестируемого источника, находятся из формул:

$$\begin{aligned} L_i^{*test} &= 116 \left(\frac{\bar{y}_i^{test}}{\bar{y}^{test}} \right)^{1/3} - 16 \\ u_i^{*test} &= 13 \cdot L_i^{*test} \cdot (u_i^{'test} - u^{'test}), \\ v_i^{*test} &= 13 \cdot L_i^{*test} (v_i^{'test} - v^{'test}) \end{aligned} \quad (5.2)$$

где \bar{y}_i^{test} , $u_i^{'test}$ и $v_i^{'test}$ описывают цвет i -той эталонной поверхности при её освещении исследуемым источником, а \bar{y}^{test} , $u^{'test}$ и $v^{'test}$ – цвет излучения исследуемого источника белого света. Необходимо заметить, что при расчете индекса цветопередачи эталонный источник (излучатель Планка) подбирается так, чтобы $\bar{y}^{test} = \bar{y}^{ref}$, $u^{'test} = u^{'ref}$ и $v^{'test} = v^{'ref}$. При этом

$$u' = \frac{4\bar{x}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}, \quad v' = \frac{9\bar{y}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}, \text{ где } u' \text{ и } v' \text{ вычисляются по}$$

параметрам спектра эталонного источника (верхний индекс ref) по параметрам спектра тестируемого источника (верхний индекс $test$), по спектру излучения эталонного источника, отраженного от эталонной поверхности (верхний индекс ref и нижний индекс i) и по спектру излучения тестируемого источника, отраженного от эталонной поверхности (верхний индекс $test$ и нижний индекс i).

5.3 Расчёт цветовых разностей

Величина ΔE_i^* , являющаяся цветовой разностью эталонной поверхности при ее освещении эталонным и тестируемым источниками находится по формуле

$$\Delta E_i^* = \sqrt{(\Delta L_i^*)^2 + (\Delta u_i^*)^2 + (\Delta v_i^*)^2}, \quad (5.3)$$

где ΔL_i^* , Δu_i^* и Δv_i^* – разности между значениями координат цветового пространства $L^*u^*v^*$, определяющими цветовую разность эталонной поверхности и эталонного излучателя и значениями координат цветового пространства $L^*u^*v^*$, определяющими цветовую разность эталонной поверхности и тестируемого источника, рассчитываемые по следующим формулам:

$$\Delta L_i^* = L_i^{*ref} - L_i^{*test},$$

$$\Delta u_i^* = u_i^{*ref} - u_i^{*test},$$

$$\Delta v_i^* = v_i^{*ref} - v_i^{*test}.$$

Отметим, что данный расчет не дает однозначных результатов, поскольку числовые коэффициенты в формулах определялись на основе экспериментов, и их нельзя считать оптимальными.

5.4 Расчёт индекса цветопередачи

Частные индексы цветопередачи (индексы цветопередачи для одной из эталонных поверхностей) определяются по формуле [14]:

$$CRI_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i^*, \quad (5.4)$$

соответственно, полный индекс цветопередачи рассчитывается по соотношению

$$CRI_g = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N CRI_i. \quad (5.5)$$

5.5 Пример расчёта индекса цветопередачи

Необходимо рассчитать полный индекс цветопередачи источника из подразд. 1.8. В соответствии с проведенными ранее расчётами имеем значения цветовых координат заданного источника в цветовом пространстве МКО 1931 г. CIE XYZ

$$\bar{x}^{test} = 96,70, \quad \bar{y}^{test} = 100, \quad \bar{z}^{test} = 118,54,$$

а в цветовом пространстве МКО 1976 г. $Lu'v'$

$$L^{test} = 100, \quad u'^{test} = 0,19812, \quad v'^{test} = 0,46099.$$

В качестве эталонного источника примем источник Планка с цветовой температурой

$$T_c = 7000.$$

Такой источник выбран в качестве эталонного, потому что цветовое различие между ним и источником, заданным в подразд. 1.8, не превышает значения 0,01. Цветовые координаты источника Планка в цветовом пространстве МКО 1931 г. CIE XYZ следующие

$$\bar{x}^{ref} = 96,7014, \quad \bar{y}^{ref} = 100, \quad \bar{z}^{ref} = 118,5376,$$

а в цветовом пространстве МКО 1976 г. $Lu'v'$

$$L^{ref} = 100, \quad u'^{ref} = 0,198127, \quad v'^{ref} = 0,460991.$$

Рассчитаем значения цветовых координат первой эталонной поверхности (Приложение 6), освещаемой заданным источником излучения, в цветовом пространстве МКО 1976 г. $Lu'v'$. Все необходимые для расчета данные приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Данные для проведения расчёта цветовых координат первой эталонной поверхности, освещённой заданным источником излучения

λ_i , нм	$P_{\lambda}^{test}(\lambda_i)$	$R_1(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i)$
360	56,12	0,116	0,000846	0,0000255	0,003945	0,00022
380	57,92	0,219	0,017351	0,000495	0,081808	0,002259
400	58,82	0,256	0,215492	0,005963	1,02174	0,023294
420	58,97	0,244	1,933656	0,057558	9,289836	0,235893
440	58,50	0,23	4,685799	0,309445	23,50515	1,345411
460	57,52	0,22	3,679671	0,759217	21,12141	3,450986
480	56,15	0,214	1,149132	1,670351	9,767744	7,805377
500	54,48	0,223	0,059532	3,924232	3,304616	17,59745
520	52,61	0,225	0,748881	8,403757	0,926189	37,35003
540	50,59	0,236	3,466986	11,38948	0,242355	48,26051
560	48,48	0,272	7,839871	13,1214	0,051431	48,24044
580	46,34	0,341	14,47824	13,74666	0,026071	40,3128
600	44,18	0,424	19,8993	11,82118	0,014987	27,88014
620	42,05	0,45	16,16941	7,209955	0,003596	16,02212
640	39,96	0,451	8,072771	3,15413	0,00036	6,993637
660	37,93	0,451	2,820994	1,043545	0	2,313848
680	35,97	0,455	0,765426	0,278218	0	0,611468
700	34,08	0,462	0,178857	0,064588	0	0,139802
720	32,27	0,466	0,043606	0,015747	0	0,033792
740	30,55	0,467	0,009846	0,003555	0	0,007613
760	28,91	0,467	0,002243	0,00081	0	0,001735
780	27,36	0,467	0,00053	0,000191	0	0,00041
800	25,88	0,466	0,000124	0,0000447	0	9,58E-05
820	24,49	0,465	2,87E-05	0,0000104	0	2,23E-05
$\Delta\lambda \cdot \sum_{i=1}^N$			1724,77	1539,61	1387,22	5172,59

Рассчитаем значение коэффициента k_c по формуле (1.4)

$$k_c = \frac{100}{\sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda} = \frac{100}{5172,59} = 0,01933$$

Теперь рассчитаем значения цветовых координат первой эталонной поверхности, освещаемой заданным источником излучения, в цветовом пространстве МКО 1931 г. CIE XYZ

$$\bar{x}_1^{test} = k_c \cdot \sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = 0,01933 \cdot 1724,77 = 33,34447,$$

$$\bar{y}_1^{test} = k_c \cdot \sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = 0,01933 \cdot 1539,61 = 29,76482,$$

$$\bar{z}_1^{test} = k_c \cdot \sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = 0,01933 \cdot 1387,22 = 26,81878.$$

В соответствии с формулой (1.7) получаем

$$L_1^{test} = 29,76482, \quad u_1^{test} = 0,238059, \quad v_1^{test} = 0,47813$$

Значения цветовых координат первой эталонной поверхности, освещаемой заданным источником излучения, в цветовом пространстве МКО 1976 г. $L^* u^* v^*$ определяются по формуле (5.2)

$$L_1^{*test} = 61,45077 \quad u_1^{*test} = 31,90167 \quad v_1^{*test} = 13,6951.$$

Аналогичные действия необходимо провести для определения значений цветовых координат первой эталонной поверхности, освещаемой эталонным источником излучения, в цветовом пространстве МКО 1976 г. $L^* u^* v^*$. Данные для расчёта представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2 – Данные для проведения расчёта цветовых координат первой эталонной поверхности, освещённой эталонным источником излучения

λ_i , нм	$P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i)$	$R_1(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i)$
360	6531	0,116	0,098412	0,002968	0,45918	0,025582
380	6740	0,219	2,019362	0,05757	9,521118	0,262875
400	6846	0,256	25,08016	0,694042	118,9161	2,711102
420	6864	0,244	225,054	6,699032	1081,224	27,45505
440	6808	0,23	545,3783	36,01614	2735,755	156,5919
460	6694	0,22	428,2814	88,36618	2458,347	401,6644
480	6535	0,214	133,7506	194,4166	1136,894	908,489
500	6341	0,223	6,929136	456,7573	384,6377	2048,239
520	6123	0,225	87,16627	978,1579	107,804	4347,368
540	5888	0,236	403,5449	1325,695	28,20923	5617,352
560	5643	0,272	912,5414	1527,298	5,986394	5615,066
580	5394	0,341	1685,245	1600,091	3,034657	4692,348
600	5143	0,424	2316,266	1375,978	1,744504	3245,231
620	4895	0,45	1882,123	839,2403	0,418519	1864,978
640	4652	0,451	939,6786	367,1439	0,041959	814,0663
660	4415	0,451	328,3686	121,4705	0	269,3359

680	4187	0,455	89,09744	32,38521	0	71,17629
700	3967	0,462	20,81946	7,518289	0	16,27335
720	3757	0,466	5,075884	1,832995	0	3,933465
740	3556	0,467	1,146071	0,413867	0	0,886225
760	3365	0,467	0,261132	0,0943	0	0,201926
780	3184	0,467	0,061728	0,022291	0	0,047733
800	3013	0,466	0,014396	0,005199	0	0,011156
820	2850	0,465	0,003343	0,001207	0	0,002597
$\Delta\lambda \cdot \sum_{i=1}^N$			200760,1	179207,1	161459,9	602074,4

Рассчитаем значение коэффициента k_c

$$k_c = \frac{100}{\sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda} = \frac{100}{602074,4} = 0,000166$$

Теперь рассчитаем значения цветовых координат первой эталонной поверхности, освещаемой эталонным источником излучения, в цветовом пространстве МКО 1931 г. CIE XYZ

$$\bar{x}_1^{ref} = k_c \cdot \sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = 33,34473,$$

$$\bar{y}_1^{ref} = k_c \cdot \sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = 29,76495,$$

$$\bar{z}_1^{ref} = k_c \cdot \sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = 26,81726.$$

В соответствии с формулой (1.7) получаем

$$L_1^{ref} = 29,76, \quad u_1'^{ref} = 0,238062, \quad v_1'^{ref} = 0,478134$$

Значения цветовых координат первой эталонной поверхности, освещаемой эталонным источником излучения, в цветовом пространстве МКО 1976 г. $L^* u^* v^*$ определяются по формуле (5.1)

$$L_1^{*ref} = 61,45089 \quad u_1^{*ref} = 31,90231 \quad v_1^{*ref} = 13,69464.$$

Таким образом, величина цветовой разности первой эталонной поверхности при ее освещении эталонным и заданным источниками, определяется по формуле (5.3) и имеет следующее значение

$$\Delta E_1^* = 0,000797.$$

Следовательно, частный индекс цветопередачи первой эталонной поверхности, рассчитываемый по соотношению (5.4), равен

$$CRI_1 = 99,99633.$$

Для определения частных индексов цветопередачи остальных эталонных поверхностей необходимо провести аналогичные расчёты. Легко убедиться, что частные индексы цветопередачи восьми основных эталонных поверхностей для заданного источника относительно выбранного эталонного источника имеют следующие значения

$$\begin{aligned}CRI_1 &= 99,99633 & CRI_2 &= 99,99848 & CRI_3 &= 99,99765 \\CRI_4 &= 99,99857 & CRI_5 &= 99,9994 & CRI_6 &= 99,99872. \\CRI_7 &= 99,99869 & CRI_8 &= 99,99881\end{aligned}$$

Таким образом, полный индекс цветопередачи (по восьми основным поверхностям), рассчитываемый по формуле (5.5), имеет значение

$$CRI_{g(8)} = 99,99833.$$

Легко получить значение полного индекса цветопередачи для восьми основных и шести дополнительных (Приложение 7) эталонных поверхностей

$$CRI_{g(14)} = 99,99826.$$

5.6 Вопросы для самопроверки

- В чем состоят ограничения использования представленного метода расчета индекса цветопередачи источников излучения?
- Методика проведения расчета индекса цветопередачи для источников излучения, расположенных на кривой Планка.
- Частный индекс цветопередачи источника излучения – понятие и формула расчета.
- Каково максимально возможное значение частного индекса цветопередачи источника излучения?
- Может ли частный индекс цветопередачи источника излучения иметь отрицательное значение? Если да, то что это может означать?
- Полный индекс цветопередачи источника излучения – понятие и формула расчета.
- Каково максимально возможное значение полного индекса цветопередачи источника излучения?
- Может ли полный индекс цветопередачи источника излучения иметь отрицательное значение? Если да, то что это может означать?
- В чем суть представленного метода расчета индекса цветопередачи для источников излучения, расположенных на кривой Планка?
- Какие источники излучения могут быть охарактеризованы при помощи данного метода расчета индекса цветопередачи?

6 РАСЧЁТ ИНДЕКСА ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ВНЕ КРИВОЙ ПЛАНКА

Экспериментально было доказано, что качество источников белого света резко снижается при удалении их координат цветностей на цветовой диаграмме, x и y , от кривой Планка более чем на 0,01. Эта величина соответствует размерам приблизительно четырех эллипсов МакАдама – стандарту, принятому для осветительных приборов. Однако следует отметить, что критерий «отклонения на 0,01» является необходимым, но недостаточным для получения высококачественных источников освещения.

Если координаты цветности тестового источника не принадлежат кривой Планка, то эталонный источник должен быть абсолютно черным телом, имеющим ту же коррелированную цветовую температуру, что и тестируемый излучатель.

Следующие расчеты справедливы для исследуемых источников излучения, расположенных вне кривой Планка. В указанных расчетах учитывается адаптивный сдвиг цвета, возникающий из-за способности человека к цветовой адаптации.

6.1 Определение цветовых координат

Расчет начинается с определения координат цветности эталонного и тестируемого источников излучения на равноконтрастной цветовой диаграмме $Lu'v'$, а также координат цветности эталонных отражающих поверхностей при их освещении эталонным и тестируемым источниками, т.е. (u'^{ref}, v'^{ref}) , (u'^{test}, v'^{test}) , $(u_i'^{ref}, v_i'^{ref})$ и $(u_i'^{test}, v_i'^{test})$.

При этом

$$u' = \frac{4\bar{x}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}, \quad v' = \frac{9\bar{y}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}, \quad u' \text{ и } v' \text{ вычисляются по}$$

параметрам спектра эталонного источника (верхний индекс ref), по спектру излучения эталонного источника, отраженного от эталонной поверхности (верхний индекс ref и нижний индекс i), по спектру излучения тестируемого источника (верхний индекс $test$), и по спектру излучения тестируемого источника, отраженного от эталонной поверхности (верхний индекс $test$ и нижний индекс i).

Необходимо заметить, что эталонный источник излучения в виде излучателя Планка подбирается таким образом, что коррелированная цветовая температура тестируемого источника равна цветовой температуре эталонного источника ($T_c'^{ref} = T_c'^{test}$).

6.2 Расчёт адаптивного цветового сдвига

Для нахождения адаптивного цветового сдвига координат (u', v') в парах значений (u'^{ref}, v'^{ref}) , (u'^{test}, v'^{test}) и $(u_i'^{test}, v_i'^{test})$ преобразуются в координаты (r, f) при помощи следующих выражений [14]:

$$\begin{aligned} r &= \frac{4 - u' - 10v'}{v'} \\ f &= \frac{(1,708 \cdot v' + 0,404 - 1,481 \cdot u')}{v'} \end{aligned} \quad (6.1)$$

Отметим, что за этими двумя уравнениями скрываются шесть выражений, преобразующих (u'^{ref}, v'^{ref}) , (u'^{test}, v'^{test}) и $(u_i'^{test}, v_i'^{test})$ в (r^{ref}, f^{ref}) , (r^{test}, f^{test}) и (r_i^{test}, f_i^{test}) соответственно, по которым и находят координаты цветности эталонных поверхностей после адаптивного цветового сдвига $(u_i^{**test}, v_i^{**test})$:

$$\begin{aligned} u_i^{**test} &= \frac{10,872 + 0,404 \left(\frac{r^{ref}}{r^{test}} \right) \cdot r_i^{test} - 4 \left(\frac{f^{ref}}{f^{test}} \right) \cdot f_i^{test}}{16,518 + 1,481 \left(\frac{r^{ref}}{r^{test}} \right) \cdot r_i^{test} - \left(\frac{f^{ref}}{f^{test}} \right) \cdot f_i^{test}} \\ v_i^{**test} &= \frac{5,520}{16,518 + 1,481 \left(\frac{r^{ref}}{r^{test}} \right) \cdot r_i^{test} - \left(\frac{f^{ref}}{f^{test}} \right) \cdot f_i^{test}} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Соответственно, координаты цветности тестируемого излучателя после адаптивного цветового сдвига (u^{**test}, v^{**test}) находятся по формулам

$$\begin{aligned} u^{**test} &= \frac{10,872 + 0,404 \cdot r^{ref} - 4 f^{ref}}{16,518 + 1,481 \cdot r^{ref} - f^{ref}} = u'^{ref} \\ v^{**test} &= \frac{5,520}{16,518 + 1,481 \cdot r^{ref} - f^{ref}} = v'^{ref} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Значения u^{**test} и v^{**test} – координаты цветности источника света, учитывающие адаптивный цветовой сдвиг (отметим еще раз, что $u^{**test} = u'^{ref}$, $v^{**test} = v'^{ref}$).

6.3 Расчёт индекса цветопередачи

Теперь с помощью координат в универсальном цветовом пространстве можно найти искомую величину цветовой разности:

$$\Delta E_i^* = \sqrt{(\Delta L_i^{**})^2 + (\Delta u_i^{**})^2 + (\Delta v_i^{**})^2}, \quad (6.4)$$

где ΔL_i^{**} , Δu_i^{**} и Δv_i^{**} – разности между значениями координат, определяющими цветовую разность эталонной поверхности и эталонного излучателя, и значениями координат, определяющими цветовую разность эталонной поверхности и тестируемого излучателя, рассчитываемые по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\Delta L_i^{**} &= L_i^{**ref} - L_i^{**test}, \\ \Delta u_i^{**} &= u_i^{***ref} - u_i^{***test}, \\ \Delta v_i^{**} &= v_i^{***ref} - v_i^{***test}.\end{aligned}$$

При этом координаты $(L_i^{**ref}, u_i^{***ref}, v_i^{***ref})$, определяющие цветовую разность объекта и эталонного излучателя, находятся из соотношений:

$$\begin{aligned}L_i^{**ref} &= \left[116 \left(\frac{\bar{y}_i^{ref}}{\bar{y}^{ref}} \right)^{1/3} - 16 \right] \\ u_i^{***ref} &= 13 \cdot L_i^{**ref} \cdot (u_i'^{ref} - u'^{ref}), \\ v_i^{***ref} &= 13 \cdot L_i^{**ref} \cdot (v_i'^{ref} - v'^{ref})\end{aligned}\tag{6.5}$$

где \bar{y}_i^{ref} , $u_i'^{ref}$ и $v_i'^{ref}$ описывают цвет i -той эталонной поверхности при её освещении эталонным источником, а \bar{y}^{ref} , u'^{ref} и v'^{ref} описывают цвет излучения эталонного источника белого света.

Координаты $(L_i^{**test}, u_i^{***test}, v_i^{***test})$, определяющие цветовую разность эталонной поверхности и тестируемого источника с учётом адаптивного цветового сдвига, находятся из формул:

$$\begin{aligned}L_i^{**test} &= \left[116 \left(\frac{\bar{y}_i^{test}}{\bar{y}^{test}} \right)^{1/3} - 16 \right] \\ u_i^{***test} &= 13 \cdot L_i^{**test} \cdot (u_i^{**test} - u^{**test}), \\ v_i^{***test} &= 13 \cdot L_i^{**test} \cdot (v_i^{**test} - v^{**test})\end{aligned}\tag{6.6}$$

где \bar{y}_i^{test} описывает цвет i -той эталонной поверхности при её освещении исследуемым источником, \bar{y}^{test} – цвет излучения исследуемого источника белого света, а u_i^{**test} , u^{**test} , v_i^{**test} и v^{**test} были рассчитаны в ходе определения адаптивного цветового сдвига.

Используя полученные значения цветовой разности ΔE_i^* для i -той эталонной поверхности, по формулам (6.7) и (6.8) находят частные и полный индексы цветопередачи. Для получения полного представления о цветопередаче источников освещения прибегают к нахождению частных индексов цветопередачи CRI_i для шести дополнительных эталонных отражающих поверхностей ($i = 9-14$) (рис. 6.1).

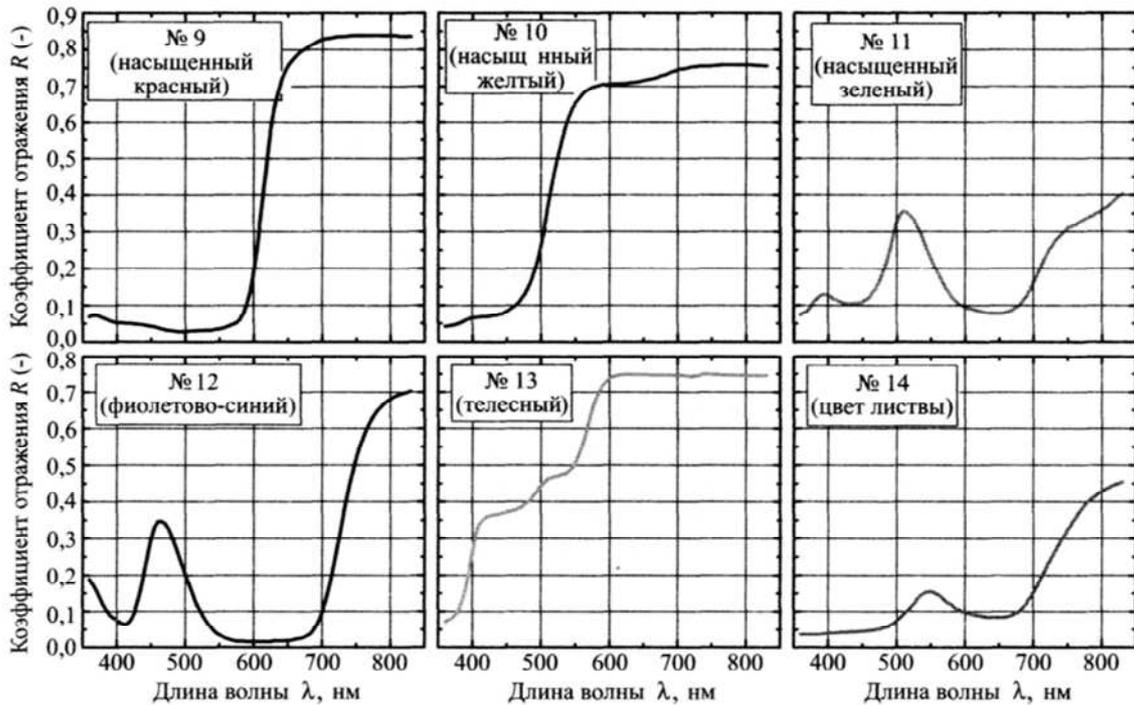


Рисунок 6.1 – Графика отражательной способности для шести дополнительных эталонных отражающих поверхностей

Частные индексы цветопередачи определяются по формуле:

$$CRI_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i^*, \quad (6.7)$$

соответственно, полный индекс цветопередачи тестируемого источника рассчитывается по соотношению:

$$CRI_g = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N CRI_i. \quad (6.8)$$

6.4 Пример расчёта индекса цветопередачи

Необходимо рассчитать полный индекс цветопередачи источника из подразд. 1.8. В соответствии с проведенными ранее расчётами имеем значения цветовых координат заданного источника в цветовом пространстве МКО 1931 г. CIE XYZ

$$\bar{x}^{test} = 96,70, \quad \bar{y}^{test} = 100, \quad \bar{z}^{test} = 118,54,$$

а в цветовом пространстве МКО 1976 г. $Lu'v'$

$$L^{test} = 100, \quad u'^{test} = 0,19812, \quad v'^{test} = 0,46099.$$

В качестве эталонного источника примем источник Планка с цветовой температурой, равной по значению коорелированной цветовой температуре заданного источника

$$T_c = 6967.$$

Такой источник выбран в качестве эталонного, потому что цветовое различие между ним и источником, заданным в подразд. 1.8, превышает

значение 0,01 (см. подразд. 4.6) (в принципе, в качестве эталонного источника может быть выбран любой источник излучения, для которого цветовое различие между ним и заданным источником излучения превышает значение 0,01). Цветовые координаты источника Планка в цветовом пространстве МКО 1931 г. CIE XYZ следующие

$$\bar{x}^{ref} = 96,70442, \quad \bar{y}^{ref} = 100, \quad \bar{z}^{ref} = 118,1095,$$

а в цветовом пространстве МКО 1976 г. $Lu'v'$

$$L^{ref} = 100, \quad u'^{ref} = 0,198263, \quad v'^{ref} = 0,461294.$$

Рассчитаем значения цветовых координат первой эталонной поверхности (Приложение 6), освещаемой заданным источником излучения, в цветовом пространстве МКО 1976 г. $Lu'v'$. Все необходимые для расчета данные приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 – Данные для проведения расчёта цветовых координат первой эталонной поверхности, освещённой заданным источником излучения

λ_i , нм	$P_{\lambda}^{test}(\lambda_i)$	$R_1(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i)$
360	56,12	0,116	0,000846	0,0000255	0,003945	0,00022
380	57,92	0,219	0,017351	0,000495	0,081808	0,002259
400	58,82	0,256	0,215492	0,005963	1,02174	0,023294
420	58,97	0,244	1,933656	0,057558	9,289836	0,235893
440	58,50	0,23	4,685799	0,309445	23,50515	1,345411
460	57,52	0,22	3,679671	0,759217	21,12141	3,450986
480	56,15	0,214	1,149132	1,670351	9,767744	7,805377
500	54,48	0,223	0,059532	3,924232	3,304616	17,59745
520	52,61	0,225	0,748881	8,403757	0,926189	37,35003
540	50,59	0,236	3,466986	11,38948	0,242355	48,26051
560	48,48	0,272	7,839871	13,1214	0,051431	48,24044
580	46,34	0,341	14,47824	13,74666	0,026071	40,3128
600	44,18	0,424	19,8993	11,82118	0,014987	27,88014
620	42,05	0,45	16,16941	7,209955	0,003596	16,02212
640	39,96	0,451	8,072771	3,15413	0,00036	6,993637
660	37,93	0,451	2,820994	1,043545	0	2,313848
680	35,97	0,455	0,765426	0,278218	0	0,611468
700	34,08	0,462	0,178857	0,064588	0	0,139802
720	32,27	0,466	0,043606	0,015747	0	0,033792
740	30,55	0,467	0,009846	0,003555	0	0,007613
760	28,91	0,467	0,002243	0,00081	0	0,001735
780	27,36	0,467	0,00053	0,000191	0	0,00041

800	25,88	0,466	0,000124	0,0000447	0	9,58E-05
820	24,49	0,465	2,87E-05	0,0000104	0	2,23E-05
$\Delta\lambda \cdot \sum_{i=1}^N$			1724,77	1539,61	1387,22	5172,59

Рассчитаем значение коэффициента k_c по формуле (1.4)

$$k_c = \frac{100}{\sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda} = \frac{100}{5172,59} = 0,01933$$

Теперь рассчитаем значения цветовых координат первой эталонной поверхности, освещаемой заданным источником излучения, в цветовом пространстве МКО 1931 г. CIE XYZ

$$\bar{x}_1^{test} = k_c \cdot \sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = 0,01933 \cdot 1724,77 = 33,34447,$$

$$\bar{y}_1^{test} = k_c \cdot \sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = 0,01933 \cdot 1539,61 = 29,76482,$$

$$\bar{z}_1^{test} = k_c \cdot \sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{test}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = 0,01933 \cdot 1387,22 = 26,81878.$$

В соответствии с формулой (1.7) получаем

$$L_1^{test} = 29,76482, \quad u_1^{test} = 0,238059, \quad v_1^{test} = 0,47813.$$

Значения цветовых координат первой эталонной поверхности, освещаемой эталонным источником, в цветовом пространстве МКО 1931 г. CIE XYZ следующие

Аналогичные действия необходимо провести для определения значений цветовых координат первой эталонной поверхности, освещаемой эталонным источником излучения, в цветовом пространстве МКО 1976 г. $Lu'v'$. Данные для расчёта представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2 – Данные для проведения расчёта цветовых координат первой эталонной поверхности, освещённой эталонным источником излучения

λ_i , нм	$P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i)$	$R_1(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i)$	$P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i)$
360	6361	0,116	0,095847	0,00289	0,447213	0,024915
380	6574	0,219	1,969412	0,056146	9,285606	0,256372
400	6685	0,256	24,48963	0,6777	116,1161	2,647267
420	6710	0,244	219,9963	6,548484	1056,925	26,83805
440	6662	0,23	533,6515	35,24171	2676,93	153,2248

460	6556	0,22	419,4503	86,54408	2407,656	393,3822
480	6405	0,214	131,1003	190,5642	1114,366	890,4869
500	6220	0,223	6,796932	448,0427	377,2991	2009,16
520	6010	0,225	85,56207	960,156	105,82	4267,36
540	5784	0,236	396,369	1302,121	27,70761	5517,463
560	5546	0,272	896,8379	1501,015	5,883377	5518,439
580	5304	0,341	1657,138	1573,404	2,984045	4614,089
600	5060	0,424	2278,775	1353,706	1,716268	3192,703
620	4818	0,45	1852,519	826,04	0,411936	1835,645
640	4581	0,451	925,2986	361,5255	0,041317	801,6086
660	4350	0,451	323,4739	119,6599	0	265,3212
680	4126	0,455	87,80245	31,91451	0	70,14178
700	3911	0,462	20,5241	7,411628	0	16,04249
720	3705	0,466	5,005529	1,807588	0	3,878945
740	3508	0,467	1,130537	0,408257	0	0,874213
760	3321	0,467	0,257668	0,093049	0	0,199247
780	3143	0,467	0,060926	0,022002	0	0,047112
800	2974	0,466	0,014212	0,005132	0	0,011014
820	2815	0,465	0,003302	0,001192	0	0,002564
$\Delta\lambda \cdot \sum_{i=1}^N$			197366,5	176139,4	158071,8	591596,9

Рассчитаем значение коэффициента k_c

$$k_c = \frac{100}{\sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda} = \frac{100}{591596,9} = 0,000169$$

Теперь рассчитаем значения цветовых координат первой эталонной поверхности, освещаемой эталонным источником излучения, в цветовом пространстве МКО 1931 г. CIE XYZ

$$\bar{x}_1^{ref} = k_c \cdot \sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = 33,36164,$$

$$\bar{y}_1^{ref} = k_c \cdot \sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = 29,77355,$$

$$\bar{z}_1^{ref} = k_c \cdot \sum_{i=1}^n P_{\lambda}^{ref}(\lambda_i) \cdot R_1(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = 26,71951.$$

В соответствии с формулой (1.7) получаем

$$L_1^{test} = 29,77, \quad u_1^{test} = 0,238245, \quad v_1^{test} = 0,478398.$$

Расчитаем величину адаптивного цветового сдвига координат (u', v') для заданного и эталонного источников, а также для первой эталонной поверхности, освещаемой заданным источником. Для этого необходимо найти координаты (r, f) по формулам (6.1):

$$r^{ref} = \frac{4 - u'^{ref} - 10v'^{ref}}{v'^{ref}} = -1,75854$$

$$f^{ref} = \frac{(1,708 \cdot v'^{ref} + 0,404 - 1,481 \cdot u'^{ref})}{v'^{ref}} = 1,947267$$

$$r^{test} = \frac{4 - u'^{test} - 10v'^{test}}{v'^{test}} = -1,75274$$

$$f^{test} = \frac{(1,708 \cdot v'^{test} + 0,404 - 1,481 \cdot u'^{test})}{v'^{test}} = 1,947871$$

$$r_1^{test} = \frac{4 - u_1'^{test} - 10v_1'^{test}}{v_1'^{test}} = -2,13197$$

$$f_1^{test} = \frac{(1,708 \cdot v_1'^{test} + 0,404 - 1,481 \cdot u_1'^{test})}{v_1'^{test}} = 1,815576$$

Затем определим координаты цветности первой эталонной поверхностей после адаптивного цветового сдвига по формуле (6.2)

$$u_1^{**test} = \frac{10,872 + 0,404 \left(\frac{r^{ref}}{r^{test}} \right) \cdot r_1^{test} - 4 \left(\frac{f^{ref}}{f^{test}} \right) \cdot f_1^{test}}{16,518 + 1,481 \left(\frac{r^{ref}}{r^{test}} \right) \cdot r_1^{test} - \left(\frac{f^{ref}}{f^{test}} \right) \cdot f_1^{test}} = 0,238211$$

$$v_1^{**test} = \frac{5,520}{16,518 + 1,481 \left(\frac{r^{ref}}{r^{test}} \right) \cdot r_1^{test} - \left(\frac{f^{ref}}{f^{test}} \right) \cdot f_1^{test}} = 0,478539$$

Расчитав координаты цветности заданного источника излучения после адаптивного цветового сдвига по формулам (6.3), легко доказать, что

$$u^{**test} = \frac{10,872 + 0,404 \cdot r^{ref} - 4 f^{ref}}{16,518 + 1,481 \cdot r^{ref} - f^{ref}} = 0,198263 = u'^{ref}$$

$$v^{**test} = \frac{5,520}{16,518 + 1,481 \cdot r^{ref} - f^{ref}} = 0,461294 = v'^{ref}$$

Цветовая разность первой эталонной поверхности, освещаемой эталонным источником, и эталонного источника рассчитывается по выражениям (6.5) и составляет:

$$L_1^{**ref} = \left[116 \left(\frac{\bar{y}_1^{ref}}{\bar{y}^{ref}} \right)^{1/3} - 16 \right] = 61,45834$$

$$u_1^{***ref} = 13 \cdot L_1^{**ref} \cdot (u_1'^{ref} - u'^{ref}) = 31,94389.$$

$$v_1^{***ref} = 13 \cdot L_1^{**ref} \cdot (v_1'^{ref} - v'^{ref}) = 13,66532$$

Цветовая разность первой эталонной поверхности, освещаемой заданным источником, и эталонного источника рассчитывается по выражениям (6.6) и составляет:

$$L_1^{**test} = \left[116 \left(\frac{\bar{y}_1^{test}}{\bar{y}^{test}} \right)^{1/3} - 16 \right] = 61,45077$$

$$u_1^{***test} = 13 \cdot L_1^{**test} \cdot (u_1'^{test} - u'^{test}) = 31,91271.$$

$$v_1^{***test} = 13 \cdot L_1^{**test} \cdot (v_1'^{test} - v'^{test}) = 13,77661$$

Следовательно, величина цветовой разности первой эталонной поверхности при ее освещении эталонным и заданным источниками, определяется по формуле (6.4) и имеет следующее значение

$$\Delta E_1^* = 0,115821.$$

Следовательно, частный индекс цветопередачи первой эталонной поверхности, рассчитываемый по соотношению (6.7), равен

$$CRI_1 = 99,46722.$$

Для определения частных индексов цветопередачи остальных эталонных поверхностей необходимо провести аналогичные расчёты. Легко убедиться, что частные индексы цветопередачи восьми основных эталонных поверхностей для заданного источника относительно выбранного эталонного источника имеют следующие значения

$$CRI_1 = 99,46722 \quad CRI_2 = 99,70856 \quad CRI_3 = 99,55055$$

$$CRI_4 = 99,77626 \quad CRI_5 = 99,92485 \quad CRI_6 = 99,73219.$$

$$CRI_7 = 99,74739 \quad CRI_8 = 99,83607$$

Таким образом, полный индекс цветопередачи (по восьми основным поверхностям), рассчитываемый по формуле (6.8), имеет значение

$$CRI_{g(8)} = 99,71789.$$

Легко получить значения частных индексов цветопередачи для шести дополнительных (Приложение 7) эталонных поверхностей:

$$CRI_9 = 99,85894 \quad CRI_{10} = 99,1731 \quad CRI_{11} = 99,83908$$

$$CRI_{12} = 99,8916 \quad CRI_{13} = 99,73306 \quad CRI_{14} = 99,86665$$

Поэтому, полный индекс цветопередачи по восьми основным и шести дополнительным эталонным поверхностям составляет

$$CRI_{g(14)} = 99,72182.$$

6.5 Вопросы для самопроверки

- В чем особенность данного метода расчета индекса цветопередачи источника излучения?
- Методика проведения расчета индекса цветопередачи источников излучения, расположенных вне кривой Планка.
- Адаптивный цветовой сдвиг. Назначение и методика расчета.
- Критерий, по которому определяют, находится ли исследуемый источник излучения вне кривой Планка.
- Назначение шести дополнительных эталонных отражающих поверхностей.
- Возможный диапазон изменения значений частных индексов цветопередачи.
- Возможный диапазон изменения значения полного индекса цветопередачи.

Литература

- 1 Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.: ил. ISBN 5-283-00545-3.
- 2 М.Д. Фершильд Модели цветового восприятия, второе издание: пер. с англ. – СПб., 2006.
- 3 Кравков С.В. Цветовое зрение – изд-во академии наук СССР, Москва, 1951 г., 175 стр.
- 4 Н.Д. Ньюберг «Измерение цвета и цветовые стандарты» – Государственное издательство СТАНДАРТИЗАЦИЯ И РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ Москва, 1933, 104 стр.
- 5 Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Чериоризов А.М. Психофизиология цветового зрения. М.: Изд-во МГУ, 1989. – 206 с. ISBN 5-211-00228-8.
- 6 Е.Н. Юстова «Цветовые измерения (Колориметрия)», изд. СПб. Университета, 2000г.
- 7 Агостон Ж. Теория цвета и ее применение в искусстве и дизайне: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 184 с., ил.
- 8 Colorimetry : understanding the CIE system / edited by Janos Schanda. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada, 2007. ISBN 978-0-470-04904-4.
- 9 Джадд Д., Вышецки Г., Цвет в науке и технике: Пер. с англ. – под ред. д.т.н., проф. Л.Ф. Артюшина. – М.: Мир, 1978 г. – 592 с., ил.
- 10 Сайт www.brucelindbloom.com.
- 11 Гуревич М.М. Цвет и его измерение. Изд-во Академии наук СССР М-Л, 1950 г.
- 12 Миннарт М. «Свет и цвет в природе» М., 1969 г., 360 стр. с илл.
- 13 Кириллов Е.А. Цветоведение: Учеб. пособие для вузов. – М.: Легпромбытиздат, 1987 г. – 128 с.
- 14 Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. под. Ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с. – ISBN 978-5-9221-0851-5.
- 15 Goethe's Theory of Colours; Translated from the german: with notes by Charles Lock Eastlake, r.a., f.r.s. London: John Murray, Albemarle street. 1840.
- 16 Луизов А.В. Глаз и свет. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1983. – 144 с., ил.
- 17 Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. – СПб.: Питер, 2009. – 224 с.: ил. – (Серия «Учебный курс»). ISBN 978-5-388-00341-6.

18 Пешкова В.М., Громова М.И. Практическое руководство по спектрофотометрии и колориметрии. Изд-е второе, пер. и дополненное. М.: Изд-во МГУ, 1965 г., 132 стр., ил.

19 Форсайт Д.А., Понс Ж., Компьютерное зрение. Современный подход. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.: ил. – Парал. тит. англ. ISBN 5-8459-0542-7.

20 Р.В.Г. Хант Цветовоспроизведение, шестое издание: пер. с англ. – СПб., 2009 г.

21 Годен Ж. Колориметрия при видеообработке. Москва: Техносфера, 2008. – 328 с., 2 стр. цв. наклейки. ISBN 978-5-94836-173-4.

22 А. Берг, П. Дин «Светодиоды»: пер. с англ. – М.: Мир – 1979 г.

Приложения

Приложение 1 – Кривые сложения для цветового пространства МКО 1931 г.

λ , нм	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	λ , нм	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
360	0,000130	0,000004	0,000606	596	1,059794	0,682219	0,000969
361	0,000146	0,000004	0,000681	597	1,061799	0,669472	0,000930
362	0,000164	0,000005	0,000765	598	1,062807	0,656674	0,000887
363	0,000184	0,000006	0,000860	599	1,062910	0,643845	0,000843
364	0,000207	0,000006	0,000967	600	1,062200	0,631000	0,000800
365	0,000232	0,000007	0,001086	601	1,060735	0,618156	0,000761
366	0,000261	0,000008	0,001221	602	1,058444	0,605314	0,000724
367	0,000293	0,000009	0,001373	603	1,055224	0,592476	0,000686
368	0,000329	0,000010	0,001544	604	1,050977	0,579638	0,000645
369	0,000370	0,000011	0,001734	605	1,045600	0,566800	0,000600
370	0,000415	0,000012	0,001946	606	1,039037	0,553961	0,000548
371	0,000464	0,000014	0,002177	607	1,031361	0,541137	0,000492
372	0,000519	0,000016	0,002436	608	1,022666	0,528353	0,000435
373	0,000582	0,000017	0,002732	609	1,013048	0,515632	0,000383
374	0,000655	0,000020	0,003078	610	1,002600	0,503000	0,000340
375	0,000742	0,000022	0,003486	611	0,991368	0,490469	0,000307
376	0,000845	0,000025	0,003975	612	0,979331	0,478030	0,000283
377	0,000965	0,000028	0,004541	613	0,966492	0,465678	0,000265
378	0,001095	0,000032	0,005158	614	0,952848	0,453403	0,000252
379	0,001231	0,000035	0,005803	615	0,938400	0,441200	0,000240
380	0,001368	0,000039	0,006450	616	0,923194	0,429080	0,000230
381	0,001502	0,000043	0,007083	617	0,907244	0,417036	0,000221
382	0,001642	0,000047	0,007745	618	0,890502	0,405032	0,000212
383	0,001802	0,000052	0,008501	619	0,872920	0,393032	0,000202
384	0,001996	0,000057	0,009415	620	0,854450	0,381000	0,000190
385	0,002236	0,000064	0,010550	621	0,835084	0,368918	0,000174
386	0,002535	0,000072	0,011966	622	0,814946	0,356827	0,000156
387	0,002893	0,000082	0,013656	623	0,794186	0,344777	0,000136
388	0,003301	0,000094	0,015588	624	0,772954	0,332818	0,000117
389	0,003753	0,000106	0,017730	625	0,751400	0,321000	0,000100
390	0,004243	0,000120	0,020050	626	0,729584	0,309338	0,000086
391	0,004762	0,000135	0,022511	627	0,707589	0,297850	0,000075
392	0,005330	0,000151	0,025203	628	0,685602	0,286594	0,000065
393	0,005979	0,000170	0,028280	629	0,663810	0,275625	0,000057
394	0,006741	0,000192	0,031897	630	0,642400	0,265000	0,000050
395	0,007650	0,000217	0,036210	631	0,621515	0,254763	0,000044

396	0,008751	0,000247	0,041438	632	0,601114	0,244890	0,000039
397	0,010029	0,000281	0,047504	633	0,581105	0,235334	0,000036
398	0,011422	0,000319	0,054120	634	0,561398	0,226053	0,000033
399	0,012869	0,000357	0,060998	635	0,541900	0,217000	0,000030
400	0,014310	0,000396	0,067850	636	0,522600	0,208162	0,000028
401	0,015704	0,000434	0,074486	637	0,503546	0,199549	0,000026
402	0,017147	0,000473	0,081362	638	0,484744	0,191155	0,000024
403	0,018781	0,000518	0,089154	639	0,466194	0,182974	0,000022
404	0,020748	0,000572	0,098540	640	0,447900	0,175000	0,000020
405	0,023190	0,000640	0,110200	641	0,429861	0,167224	0,000018
406	0,026207	0,000725	0,124613	642	0,412098	0,159646	0,000016
407	0,029782	0,000826	0,141702	643	0,394644	0,152278	0,000014
408	0,033881	0,000941	0,161304	644	0,377533	0,145126	0,000012
409	0,038468	0,001070	0,183257	645	0,360800	0,138200	0,000010
410	0,043510	0,001210	0,207400	646	0,344456	0,131500	0,000008
411	0,048996	0,001362	0,233692	647	0,328517	0,125025	0,000005
412	0,055023	0,001531	0,262611	648	0,313019	0,118779	0,000003
413	0,061719	0,001720	0,294775	649	0,298001	0,112769	0,000001
414	0,069212	0,001935	0,330799	650	0,283500	0,107000	0,000000
415	0,077630	0,002180	0,371300	651	0,269545	0,101476	0,000000
416	0,086958	0,002455	0,416209	652	0,256118	0,096189	0,000000
417	0,097177	0,002764	0,465464	653	0,243190	0,091123	0,000000
418	0,108406	0,003118	0,519695	654	0,230727	0,086265	0,000000
419	0,120767	0,003526	0,579530	655	0,218700	0,081600	0,000000
420	0,134380	0,004000	0,645600	656	0,207097	0,077121	0,000000
421	0,149358	0,004546	0,718484	657	0,195923	0,072826	0,000000
422	0,165396	0,005159	0,796713	658	0,185171	0,068710	0,000000
423	0,181983	0,005829	0,877846	659	0,174832	0,064770	0,000000
424	0,198611	0,006546	0,959439	660	0,164900	0,061000	0,000000
425	0,214770	0,007300	1,039050	661	0,155367	0,057396	0,000000
426	0,230187	0,008087	1,115367	662	0,146230	0,053955	0,000000
427	0,244880	0,008909	1,188497	663	0,137490	0,050674	0,000000
428	0,258777	0,009768	1,258123	664	0,129147	0,047550	0,000000
429	0,271808	0,010664	1,323930	665	0,121200	0,044580	0,000000
430	0,283900	0,011600	1,385600	666	0,113640	0,041759	0,000000
431	0,294944	0,012573	1,442635	667	0,106465	0,039085	0,000000
432	0,304897	0,013583	1,494804	668	0,099690	0,036564	0,000000
433	0,313787	0,014630	1,542190	669	0,093331	0,034200	0,000000
434	0,321645	0,015715	1,584881	670	0,087400	0,032000	0,000000
435	0,328500	0,016840	1,622960	671	0,081901	0,029963	0,000000

436	0,334351	0,018007	1,656405	672	0,076804	0,028077	0,000000
437	0,339210	0,019214	1,685296	673	0,072077	0,026329	0,000000
438	0,343121	0,020454	1,709875	674	0,067687	0,024708	0,000000
439	0,346130	0,021718	1,730382	675	0,063600	0,023200	0,000000
440	0,348280	0,023000	1,747060	676	0,059807	0,021801	0,000000
441	0,349600	0,024295	1,760045	677	0,056282	0,020501	0,000000
442	0,350147	0,025610	1,769623	678	0,052971	0,019281	0,000000
443	0,350013	0,026959	1,776264	679	0,049819	0,018121	0,000000
444	0,349287	0,028351	1,780433	680	0,046770	0,017000	0,000000
445	0,348060	0,029800	1,782600	681	0,043784	0,015904	0,000000
446	0,346373	0,031311	1,782968	682	0,040875	0,014837	0,000000
447	0,344262	0,032884	1,781700	683	0,038073	0,013811	0,000000
448	0,341809	0,034521	1,779198	684	0,035405	0,012835	0,000000
449	0,339094	0,036226	1,775867	685	0,032900	0,011920	0,000000
450	0,336200	0,038000	1,772110	686	0,030564	0,011068	0,000000
451	0,333198	0,039847	1,768259	687	0,028381	0,010273	0,000000
452	0,330041	0,041768	1,764039	688	0,026345	0,009533	0,000000
453	0,326636	0,043766	1,758944	689	0,024453	0,008846	0,000000
454	0,322887	0,045843	1,752466	690	0,022700	0,008210	0,000000
455	0,318700	0,048000	1,744100	691	0,021084	0,007624	0,000000
456	0,314025	0,050244	1,733560	692	0,019600	0,007085	0,000000
457	0,308884	0,052573	1,720858	693	0,018237	0,006591	0,000000
458	0,303290	0,054981	1,705937	694	0,016987	0,006138	0,000000
459	0,297258	0,057459	1,688737	695	0,015840	0,005723	0,000000
460	0,290800	0,060000	1,669200	696	0,014791	0,005343	0,000000
461	0,283970	0,062602	1,647529	697	0,013831	0,004996	0,000000
462	0,276721	0,065278	1,623413	698	0,012949	0,004676	0,000000
463	0,268918	0,068042	1,596022	699	0,012129	0,004380	0,000000
464	0,260423	0,070911	1,564528	700	0,011359	0,004102	0,000000
465	0,251100	0,073900	1,528100	701	0,010629	0,003838	0,000000
466	0,240848	0,077016	1,486111	702	0,009939	0,003589	0,000000
467	0,229851	0,080266	1,439522	703	0,009288	0,003354	0,000000
468	0,218407	0,083667	1,389880	704	0,008679	0,003134	0,000000
469	0,206811	0,087233	1,338736	705	0,008111	0,002929	0,000000
470	0,195360	0,090980	1,287640	706	0,007582	0,002738	0,000000
471	0,184214	0,094918	1,237422	707	0,007089	0,002560	0,000000
472	0,173327	0,099046	1,187824	708	0,006627	0,002393	0,000000
473	0,162688	0,103367	1,138761	709	0,006195	0,002237	0,000000
474	0,152283	0,107885	1,090148	710	0,005790	0,002091	0,000000
475	0,142100	0,112600	1,041900	711	0,005410	0,001954	0,000000

476	0,132179	0,117532	0,994198	712	0,005053	0,001825	0,000000
477	0,122570	0,122674	0,947347	713	0,004718	0,001704	0,000000
478	0,113275	0,127993	0,901453	714	0,004404	0,001590	0,000000
479	0,104298	0,133453	0,856619	715	0,004109	0,001484	0,000000
480	0,095640	0,139020	0,812950	716	0,003834	0,001384	0,000000
481	0,087300	0,144676	0,770517	717	0,003576	0,001291	0,000000
482	0,079308	0,150469	0,729445	718	0,003334	0,001204	0,000000
483	0,071718	0,156462	0,689914	719	0,003109	0,001123	0,000000
484	0,064581	0,162718	0,652105	720	0,002899	0,001047	0,000000
485	0,057950	0,169300	0,616200	721	0,002704	0,000977	0,000000
486	0,051862	0,176243	0,582329	722	0,002523	0,000311	0,000000
487	0,046282	0,183558	0,550416	723	0,002354	0,000850	0,000000
488	0,041151	0,191274	0,520338	724	0,002197	0,000793	0,000000
489	0,036413	0,199418	0,491967	725	0,002049	0,000740	0,000000
490	0,032010	0,208020	0,465180	726	0,001911	0,000690	0,000000
491	0,027917	0,217120	0,439925	727	0,001781	0,000643	0,000000
492	0,024144	0,226735	0,416184	728	0,001660	0,000690	0,000000
493	0,020687	0,236857	0,393882	729	0,001546	0,000558	0,000000
494	0,017540	0,247481	0,372946	730	0,001440	0,000520	0,000000
495	0,014700	0,258600	0,353300	731	0,001340	0,000484	0,000000
496	0,012162	0,270185	0,334858	732	0,001246	0,000450	0,000000
497	0,009920	0,282294	0,317552	733	0,001158	0,000418	0,000000
498	0,007967	0,295051	0,301338	734	0,001076	0,000389	0,000000
499	0,006296	0,308578	0,286169	735	0,001000	0,000361	0,000000
500	0,004900	0,323000	0,272000	736	0,000929	0,000335	0,000000
501	0,003778	0,338402	0,258817	737	0,000862	0,000311	0,000000
502	0,002945	0,354686	0,246484	738	0,000801	0,000289	0,000000
503	0,002425	0,371699	0,234772	739	0,000743	0,000268	0,000000
504	0,002236	0,389288	0,223453	740	0,000690	0,000249	0,000000
505	0,002400	0,407300	0,212300	741	0,000641	0,000231	0,000000
506	0,002926	0,425630	0,201169	742	0,000595	0,000215	0,000000
507	0,003837	0,444310	0,190120	743	0,000552	0,000199	0,000000
508	0,005175	0,463394	0,179225	744	0,000512	0,000185	0,000000
509	0,006982	0,482940	0,168561	745	0,000476	0,000172	0,000000
510	0,009300	0,503000	0,158200	746	0,000442	0,000160	0,000000
511	0,012149	0,523569	0,148138	747	0,000412	0,000149	0,000000
512	0,015536	0,544512	0,138376	748	0,000383	0,000138	0,000000
513	0,019478	0,565690	0,128994	749	0,000357	0,000129	0,000000
514	0,023993	0,586965	0,120075	750	0,000332	0,000120	0,000000
515	0,029000	0,608200	0,111700	751	0,000310	0,000112	0,000000

516	0,034815	0,629346	0,103905	752	0,000289	0,000104	0,000000
517	0,041120	0,650307	0,096667	753	0,000270	0,000097	0,000000
518	0,047985	0,670875	0,089983	754	0,000252	0,000091	0,000000
519	0,055379	0,690842	0,083845	755	0,000235	0,000085	0,000000
520	0,063270	0,710000	0,078250	756	0,000219	0,000079	0,000000
521	0,071635	0,728185	0,073209	757	0,000205	0,000074	0,000000
522	0,080462	0,745464	0,068678	758	0,000191	0,000069	0,000000
523	0,089740	0,761969	0,064568	759	0,000178	0,000064	0,000000
524	0,099456	0,777837	0,060788	760	0,000166	0,000060	0,000000
525	0,109600	0,793200	0,057250	761	0,000155	0,000056	0,000000
526	0,120167	0,808110	0,053904	762	0,000145	0,000052	0,000000
527	0,131115	0,822496	0,050747	763	0,000135	0,000049	0,000000
528	0,142368	0,836307	0,047753	764	0,000126	0,000045	0,000000
529	0,153854	0,849492	0,044899	765	0,000117	0,000042	0,000000
530	0,165500	0,862000	0,042160	766	0,000110	0,000040	0,000000
531	0,177257	0,873811	0,039507	767	0,000102	0,000037	0,000000
532	0,189140	0,884962	0,036936	768	0,000095	0,000034	0,000000
533	0,201169	0,895494	0,034458	769	0,000089	0,000032	0,000000
534	0,213366	0,905443	0,032089	770	0,000083	0,000030	0,000000
535	0,225750	0,914850	0,029840	771	0,000078	0,000028	0,000000
536	0,238321	0,923735	0,028812	772	0,000072	0,000026	0,000000
537	0,251067	0,932092	0,025694	773	0,000067	0,000024	0,000000
538	0,263992	0,939923	0,023787	774	0,000063	0,000023	0,000000
539	0,277102	0,947225	0,021989	775	0,000059	0,000021	0,000000
540	0,290400	0,954000	0,020300	776	0,000055	0,000020	0,000000
541	0,303891	0,960256	0,018718	777	0,000051	0,000018	0,000000
542	0,317573	0,966007	0,017240	778	0,000048	0,000017	0,000000
543	0,331438	0,971261	0,015864	779	0,000044	0,000016	0,000000
544	0,345483	0,976023	0,014585	780	0,000042	0,000015	0,000000
545	0,359700	0,980300	0,013400	781	0,000039	0,000014	0,000000
546	0,374084	0,984092	0,012307	782	0,000036	0,000013	0,000000
547	0,388640	0,987418	0,11302	783	0,000034	0,000012	0,000000
548	0,403378	0,990313	0,010378	784	0,000031	0,000011	0,000000
549	0,418312	0,992812	0,009529	785	0,000029	0,000011	0,000000
550	0,433450	0,994950	0,008750	786	0,000027	0,000010	0,000000
551	0,448795	0,996711	0,008035	787	0,000026	0,000009	0,000000
552	0,464336	0,998098	0,007382	788	0,000024	0,000009	0,000000
553	0,480064	0,999112	0,006785	789	0,000022	0,000008	0,000000
554	0,495971	0,999748	0,006243	790	0,000021	0,000007	0,000000
555	0,512050	1,000000	0,005750	791	0,000019	0,000007	0,000000

556	0,528296	0,999857	0,005304	792	0,000018	0,000006	0,000000
557	0,544692	0,999305	0,004900	793	0,000017	0,000006	0,000000
558	0,561209	0,998326	0,004534	794	0,000016	0,000006	0,000000
559	0,577822	0,996899	0,004202	795	0,000015	0,000005	0,000000
560	0,594500	0,995000	0,003900	796	0,000014	0,000005	0,000000
561	0,611221	0,992601	0,003623	797	0,000013	0,000005	0,000000
562	0,627976	0,989743	0,003371	798	0,000012	0,000004	0,000000
563	0,644760	0,986444	0,003141	799	0,000011	0,000004	0,000000
564	0,661570	0,982724	0,002935	800	0,000010	0,000004	0,000000
565	0,678400	0,978600	0,002750	801	0,000010	0,000003	0,000000
566	0,695239	0,974084	0,002585	802	0,000009	0,000003	0,000000
567	0,712059	0,969171	0,002439	803	0,000008	0,000003	0,000000
568	0,728828	0,963857	0,002309	804	0,000008	0,000003	0,000000
569	0,745549	0,958135	0,002197	805	0,000007	0,000003	0,000000
570	0,762100	0,952000	0,002100	806	0,000007	0,000002	0,000000
571	0,778543	0,945450	0,002018	807	0,000006	0,000002	0,000000
572	0,794826	0,938499	0,001948	808	0,000006	0,000002	0,000000
573	0,810926	0,931163	0,001890	809	0,000005	0,000002	0,000000
574	0,826825	0,923458	0,001841	810	0,000005	0,000002	0,000000
575	0,842500	0,915400	0,001800	811	0,000005	0,000002	0,000000
576	0,857933	0,907006	0,001766	812	0,000004	0,000002	0,000000
577	0,873082	0,898277	0,001738	813	0,000004	0,000001	0,000000
578	0,887894	0,889205	0,001711	814	0,000004	0,000001	0,000000
579	0,902318	0,879782	0,001683	815	0,000004	0,000001	0,000000
580	0,916300	0,870000	0,001650	816	0,000003	0,000001	0,000000
581	0,929800	0,859861	0,001610	817	0,000003	0,000001	0,000000
582	0,942798	0,849392	0,001564	818	0,000003	0,000001	0,000000
583	0,955278	0,838622	0,001514	819	0,000003	0,000001	0,000000
584	0,967218	0,827581	0,001459	820	0,000003	0,000001	0,000000
585	0,978600	0,816300	0,001400	821	0,000002	0,000001	0,000000
586	0,989386	0,804795	0,001337	822	0,000002	0,000001	0,000000
587	0,999549	0,793082	0,001270	823	0,000002	0,000001	0,000000
588	1,009089	0,781192	0,001205	824	0,000002	0,000001	0,000000
589	1,018006	0,769155	0,001147	825	0,000002	0,000001	0,000000
590	1,026300	0,757000	0,001100	826	0,000002	0,000001	0,000000
591	1,033983	0,744754	0,001069	827	0,000001	0,000001	0,000000
592	1,040986	0,732422	0,001049	828	0,000001	0,000000	0,000000
593	1,047188	0,720004	0,001036	829	0,000001	0,000000	0,000000
594	1,052467	0,707497	0,001021	830	0,000001	0,000000	0,000000
595	1,056700	0,694900	0,001000				

Приложение 2 – Цветовая температура T_c в миредах (μ), координаты цветности излучателя Планка на цветовой диаграмме 1976 г. (u'_0, v'_0) и тангенсы наклонов изотермических линий (t)

T_c, μ	u'_0	v'_0	t	T_c, μ	u'_0	v'_0	t
0	0,18006	0,26352	-0,24341	250	0,22511	0,33439	-1,4512
10	0,18066	0,26589	-0,25479	275	0,23247	0,33904	-1,7298
20	0,18133	0,26846	-0,26876	300	0,2401	0,34308	-2,0637
30	0,18208	0,27119	-0,28539	325	0,24792	0,34655	-2,4681
40	0,18293	0,27407	-0,3047	350	0,25591	0,34951	-2,9641
50	0,18388	0,27709	-0,32675	375	0,264	0,352	-3,5814
60	0,18494	0,28021	-0,35156	400	0,27218	0,35407	-4,3633
70	0,18611	0,28342	-0,37915	425	0,28039	0,35577	-5,3762
80	0,1874	0,28668	-0,40955	450	0,28863	0,35714	-6,7262
90	0,1888	0,28997	-0,44278	475	0,29685	0,35823	-8,5955
100	0,19032	0,29326	-0,47888	500	0,30505	0,35907	-11,324
125	0,19462	0,30141	-0,58204	525	0,3132	0,35968	-15,628
150	0,19962	0,30921	-0,70471	550	0,32129	0,36011	-23,325
175	0,20525	0,31647	-0,84901	575	0,32931	0,36038	-40,77
200	0,21142	0,32312	-1,0182	600	0,33724	0,36051	-116,45
225	0,21807	0,32909	-0,2168				

Приложение 3 – Координаты цвета основных источников белого света

Источник	\bar{x}_w	\bar{y}_w	\bar{z}_w
A	109,850	100	35,585
B	99,072	100	85,223
C	98,074	100	118,232
D50	96,422	100	82,521
D55	95,682	100	92,149
D65	95,047	100	108,883
D75	94,972	100	122,638
E	100	100	100
F2	99,186	100	67,393
F7	95,041	100	108,747
F11	100,962	100	64,350

Приложение 4 – Параметры различных типов цветковых пространств RGB

Тип	γ	W	Основной красный			Основной зеленый			Основной синий		
			x_r	y_r	\bar{y}_r	x_g	y_g	\bar{y}_g	x_b	y_b	\bar{y}_b
Lab Gamut	-	D50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Adobe RGB (1998)	2,2	D65	0,6400	0,3300	0,297361	0,2100	0,7100	0,627355	0,1500	0,0600	0,075285
Apple RGB	1,8	D65	0,6250	0,3400	0,244634	0,2800	0,5950	0,672034	0,1550	0,0700	0,083332
Best RGB	2,2	D50	0,7347	0,2653	0,228457	0,2150	0,7750	0,737352	0,1300	0,0350	0,034191
Beta RGB	2,2	D50	0,6888	0,3112	0,303273	0,1986	0,7551	0,663786	0,1265	0,0352	0,032941
Bruce RGB	2,2	D65	0,6400	0,3300	0,240995	0,2800	0,6500	0,683554	0,1500	0,0600	0,075452
CIE RGB	2,2	E	0,7350	0,2650	0,176204	0,2740	0,7170	0,812985	0,1670	0,0090	0,010811
ColorMatch RGB	1,8	D50	0,6300	0,3400	0,274884	0,2950	0,6050	0,658132	0,1500	0,0750	0,066985
Don RGB 4	2,2	D50	0,6960	0,3000	0,278350	0,2150	0,7650	0,687970	0,1300	0,0350	0,033680
ECI RGB v2	L*	D50	0,6700	0,3300	0,320250	0,2100	0,7100	0,602071	0,1400	0,0800	0,077679
Ekta Space PS5	2,2	D50	0,6950	0,3050	0,260629	0,2600	0,7000	0,734946	0,1100	0,0050	0,004425
NTSC RGB	2,2	C	0,6700	0,3300	0,298839	0,2100	0,7100	0,586811	0,1400	0,0800	0,114350
PAL/ SECAM RGB	2,2	D65	0,6400	0,3300	0,222021	0,2900	0,6000	0,706645	0,1500	0,0600	0,071334
ProPhoto RGB	1,8	D50	0,7347	0,2653	0,288040	0,1596	0,8404	0,711874	0,0366	0,0001	0,000086
SMPTE-C RGB	2,2	D65	0,6300	0,3400	0,212395	0,3100	0,5950	0,701049	0,1550	0,0700	0,086556
sRGB	-	D65	0,6400	0,3300	0,212656	0,3000	0,6000	0,715158	0,1500	0,0600	0,072186
Wide Gamut RGB	2,2	D50	0,7350	0,2650	0,258187	0,1150	0,8260	0,724938	0,1570	0,0180	0,016875

Приложение 5 – Прямые и инверсированные матрицы коррекции для различных методов колориметрической коррекции

Метод	$[M_A]$			$[M_A]^{-1}$		
XYZ Scaling	1,0000000	0,0000000	0,0000000	1,0000000	0,0000000	0,0000000
	0,0000000	1,0000000	0,0000000	0,0000000	1,0000000	0,0000000
	0,0000000	0,0000000	1,0000000	0,0000000	0,0000000	1,0000000
Bradford	0,8951000	0,2664000	-0,1614000	0,9869929	-0,1470543	0,1599627
	-0,7502000	1,7135000	0,0367000	0,4323053	0,5183603	0,0492912
	0,0389000	-0,0685000	1,0296000	-0,0085287	0,0400428	0,9684867
Von Kries	0,4002400	0,7076000	-0,0808100	1,8599364	-1,1293816	0,2198974
	-0,2263000	1,1653200	0,0457000	0,3611914	0,6388125	-0,0000064
	0,0000000	0,0000000	0,9182200	0,0000000	0,0000000	1,0890636

Приложение 6 – Отражательная способность восьми эталонных цветовых поверхностей МКО

λ , нм	$R_1(\lambda)$	$R_2(\lambda)$	$R_3(\lambda)$	$R_4(\lambda)$	$R_5(\lambda)$	$R_6(\lambda)$	$R_7(\lambda)$	$R_8(\lambda)$
360	0,116	0,053	0,058	0,057	0,143	0,079	0,150	0,075
365	0,136	0,055	0,059	0,059	0,187	0,081	0,177	0,078
370	0,159	0,059	0,061	0,062	0,233	0,089	0,218	0,084
375	0,190	0,064	0,063	0,067	0,269	0,113	0,293	0,090
380	0,219	0,070	0,065	0,074	0,295	0,151	0,378	0,104
385	0,239	0,079	0,068	0,083	0,306	0,203	0,459	0,129
390	0,252	0,089	0,070	0,093	0,310	0,265	0,524	0,170
395	0,256	0,101	0,072	0,105	0,312	0,339	0,546	0,240
400	0,256	0,111	0,073	0,116	0,313	0,410	0,551	0,319
405	0,254	0,116	0,073	0,121	0,315	0,464	0,555	0,416
410	0,252	0,118	0,074	0,124	0,319	0,492	0,559	0,462
415	0,248	0,120	0,074	0,126	0,322	0,508	0,560	0,482
420	0,244	0,121	0,074	0,128	0,326	0,517	0,561	0,490
425	0,240	0,122	0,073	0,131	0,330	0,524	0,558	0,488
430	0,237	0,122	0,073	0,135	0,334	0,531	0,556	0,482
435	0,232	0,122	0,073	0,139	0,339	0,538	0,551	0,473
440	0,230	0,123	0,073	0,144	0,346	0,544	0,544	0,462
445	0,226	0,124	0,073	0,151	0,352	0,551	0,535	0,450
450	0,225	0,127	0,074	0,161	0,360	0,556	0,522	0,439
455	0,222	0,128	0,075	0,172	0,369	0,556	0,506	0,426
460	0,220	0,131	0,077	0,186	0,381	0,554	0,488	0,413
465	0,218	0,134	0,080	0,205	0,394	0,549	0,469	0,397
470	0,216	0,138	0,085	0,229	0,403	0,541	0,448	0,382

475	0,214	0,143	0,094	0,254	0,410	0,531	0,429	0,366
480	0,214	0,150	0,109	0,281	0,415	0,519	0,408	0,352
485	0,214	0,159	0,126	0,308	0,418	0,504	0,385	0,337
490	0,216	0,174	0,148	0,332	0,419	0,488	0,363	0,325
495	0,218	0,190	0,172	0,352	0,417	0,469	0,341	0,310
500	0,223	0,207	0,198	0,370	0,413	0,450	0,324	0,299
505	0,225	0,225	0,221	0,383	0,409	0,431	0,311	0,289
510	0,226	0,242	0,241	0,390	0,403	0,414	0,301	0,283
515	0,226	0,253	0,260	0,394	0,396	0,395	0,291	0,276
520	0,225	0,260	0,278	0,395	0,389	0,377	0,283	0,270
525	0,225	0,264	0,302	0,392	0,381	0,358	0,273	0,262
530	0,227	0,267	0,339	0,385	0,372	0,341	0,265	0,256
535	0,230	0,269	0,370	0,377	0,363	0,325	0,260	0,251
540	0,236	0,272	0,392	0,367	0,353	0,309	0,257	0,250
545	0,245	0,276	0,399	0,354	0,342	0,293	0,257	0,251
550	0,253	0,282	0,400	0,341	0,331	0,279	0,259	0,254
555	0,262	0,289	0,393	0,327	0,320	0,265	0,260	0,258
560	0,272	0,299	0,380	0,312	0,308	0,253	0,260	0,264
565	0,283	0,309	0,365	0,296	0,296	0,241	0,258	0,269
570	0,298	0,322	0,349	0,280	0,284	0,234	0,256	0,272
575	0,318	0,329	0,332	0,263	0,271	0,227	0,254	0,274
580	0,341	0,335	0,315	0,247	0,260	0,225	0,254	0,278
585	0,367	0,339	0,299	0,299	0,247	0,222	0,259	0,284
590	0,390	0,341	0,285	0,214	0,232	0,221	0,270	0,295
595	0,409	0,341	0,272	0,198	0,220	0,220	0,284	0,316
600	0,424	0,342	0,264	0,185	0,210	0,220	0,302	0,348
605	0,435	0,342	0,257	0,175	0,200	0,220	0,324	0,384
610	0,442	0,342	0,252	0,169	0,194	0,220	0,344	0,434
615	0,448	0,341	0,247	0,164	0,189	0,220	0,362	0,482
620	0,450	0,341	0,241	0,160	0,185	0,223	0,377	0,528
625	0,451	0,339	0,235	0,156	0,183	0,227	0,389	0,568
630	0,451	0,339	0,229	0,154	0,180	0,233	0,400	0,604
635	0,451	0,338	0,224	0,152	0,177	0,239	0,410	0,629
640	0,451	0,338	0,220	0,151	0,176	0,244	0,420	0,648
645	0,451	0,337	0,217	0,149	0,175	0,251	0,429	0,663
650	0,450	0,336	0,216	0,148	0,175	0,258	0,438	0,676
655	0,450	0,335	0,216	0,148	0,175	0,263	0,445	0,685
660	0,451	0,334	0,219	0,148	0,175	0,268	0,452	0,693
665	0,451	0,332	0,224	0,149	0,177	0,273	0,457	0,700
670	0,453	0,332	0,230	0,151	0,180	0,278	0,462	0,705
675	0,454	0,331	0,238	0,154	0,183	0,281	0,466	0,709
680	0,455	0,331	0,251	0,158	0,186	0,283	0,468	0,712

685	0,457	0,330	0,269	0,162	0,189	0,286	0,470	0,715
690	0,458	0,329	0,288	0,165	0,192	0,291	0,473	0,717
695	0,460	0,328	0,312	0,168	0,195	0,296	0,477	0,719
700	0,462	0,328	0,340	0,170	0,199	0,302	0,483	0,721
705	0,463	0,327	0,366	0,171	0,200	0,313	0,489	0,720
710	0,464	0,326	0,390	0,170	0,199	0,325	0,496	0,719
715	0,465	0,325	0,412	0,168	0,198	0,338	0,503	0,722
720	0,466	0,324	0,431	0,166	0,196	0,351	0,511	0,725
725	0,466	0,324	0,447	0,164	0,195	0,364	0,518	0,727
730	0,466	0,624	0,460	0,164	0,195	0,376	0,525	0,729
735	0,466	0,323	0,472	0,165	0,196	0,389	0,532	0,730
740	0,467	0,322	0,481	0,168	0,197	0,401	0,539	0,730
745	0,467	0,321	0,488	0,172	0,200	0,413	0,546	0,730
750	0,467	0,320	0,493	0,177	0,203	0,425	0,553	0,730
755	0,467	0,318	0,497	0,181	0,205	0,436	0,559	0,730
760	0,467	0,316	0,500	0,185	0,208	0,447	0,565	0,730
765	0,467	0,315	0,502	0,189	0,212	0,458	0,570	0,730
770	0,467	0,315	0,505	0,192	0,215	0,469	0,575	0,730
775	0,467	0,314	0,510	0,194	0,217	0,477	0,578	0,730
780	0,467	0,314	0,516	0,197	0,219	0,485	0,581	0,730
785	0,467	0,313	0,520	0,200	0,222	0,493	0,583	0,730
790	0,467	0,313	0,524	0,204	0,226	0,500	0,585	0,731
795	0,466	0,312	0,527	0,210	0,231	0,506	0,587	0,731
800	0,466	0,312	0,531	0,218	0,237	0,512	0,588	0,731
805	0,466	0,311	0,535	0,225	0,243	0,517	0,589	0,731
810	0,466	0,311	0,539	0,233	0,249	0,521	0,590	0,731
815	0,466	0,311	0,544	0,243	0,257	0,525	0,590	0,731
820	0,465	0,311	0,548	0,254	0,265	0,529	0,590	0,731
825	0,464	0,311	0,552	0,264	0,273	0,532	0,591	0,731
830	0,464	0,310	0,555	0,274	0,280	0,535	0,592	0,731

Приложение 7 – Отражательная способность шести дополнительных эталонных цветных поверхностей МКО

λ , нм	$R_9(\lambda)$	$R_{10}(\lambda)$	$R_{11}(\lambda)$	$R_{12}(\lambda)$	$R_{13}(\lambda)$	$R_{14}(\lambda)$
360	0,069	0,042	0,074	0,189	0,071	0,036
365	0,072	0,043	0,079	0,175	0,076	0,036
370	0,073	0,045	0,086	0,158	0,082	0,036
375	0,070	0,047	0,098	0,139	0,090	0,036
380	0,066	0,050	0,111	0,120	0,104	0,036
385	0,062	0,054	0,121	0,103	0,127	0,036
390	0,058	0,059	0,127	0,090	0,161	0,037
395	0,055	0,063	0,129	0,082	0,211	0,038
400	0,052	0,066	0,127	0,076	0,264	0,039
405	0,052	0,067	0,121	0,068	0,313	0,039
410	0,051	0,068	0,116	0,064	0,341	0,040
415	0,050	0,069	0,112	0,065	0,352	0,041
420	0,050	0,069	0,108	0,075	0,359	0,042
425	0,049	0,070	0,105	0,093	0,361	0,042
430	0,048	0,072	0,104	0,123	0,364	0,043
435	0,047	0,073	0,104	0,160	0,365	0,044
440	0,046	0,076	0,105	0,207	0,367	0,044
445	0,044	0,078	0,106	0,256	0,369	0,045
450	0,042	0,083	0,110	0,300	0,372	0,045
455	0,041	0,088	0,115	0,331	0,374	0,046
460	0,038	0,095	0,123	0,346	0,376	0,047
465	0,035	0,103	0,134	0,347	0,379	0,048
470	0,033	0,113	0,148	0,341	0,384	0,050
475	0,031	0,125	0,167	0,328	0,389	0,052
480	0,030	0,142	0,192	0,307	0,397	0,055
485	0,029	0,162	0,219	0,282	0,405	0,057
490	0,028	0,189	0,252	0,257	0,416	0,062
495	0,028	0,219	0,291	0,230	0,429	0,067
500	0,028	0,262	0,325	0,204	0,443	0,075
505	0,029	0,305	0,347	0,178	0,454	0,083
510	0,030	0,365	0,356	0,154	0,461	0,092
515	0,030	0,416	0,353	0,129	0,466	0,100
520	0,031	0,465	0,346	0,109	0,469	0,108
525	0,031	0,509	0,333	0,090	0,471	0,121
530	0,032	0,546	0,314	0,075	0,474	0,133
535	0,032	0,581	0,294	0,062	0,476	0,142
540	0,033	0,610	0,271	0,051	0,483	0,150
545	0,034	0,634	0,248	0,041	0,490	0,154

550	0,035	0,653	0,227	0,035	0,506	0,155
555	0,037	0,666	0,206	0,029	0,526	0,152
560	0,041	0,678	0,188	0,025	0,553	0,147
565	0,044	0,687	0,170	0,022	0,582	0,140
570	0,048	0,693	0,153	0,019	0,618	0,133
575	0,052	0,698	0,138	0,017	0,651	0,125
580	0,060	0,701	0,125	0,017	0,680	0,118
585	0,076	0,704	0,114	0,017	0,701	0,112
590	0,102	0,705	0,106	0,016	0,717	0,106
595	0,136	0,705	0,100	0,016	0,729	0,101
600	0,190	0,706	0,096	0,016	0,736	0,098
605	0,256	0,707	0,092	0,016	0,742	0,095
610	0,336	0,707	0,090	0,016	0,745	0,093
615	0,418	0,707	0,087	0,016	0,747	0,090
620	0,505	0,708	0,085	0,016	0,748	0,089
625	0,581	0,708	0,082	0,016	0,748	0,087
630	0,641	0,710	0,080	0,018	0,748	0,086
635	0,682	0,711	0,079	0,018	0,748	0,085
640	0,717	0,712	0,078	0,018	0,748	0,084
645	0,740	0,714	0,078	0,018	0,748	0,084
650	0,758	0,716	0,078	0,019	0,748	0,084
655	0,770	0,718	0,078	0,020	0,748	0,084
660	0,781	0,720	0,081	0,023	0,747	0,085
665	0,790	0,722	0,083	0,024	0,747	0,087
670	0,797	0,725	0,088	0,026	0,747	0,092
675	0,803	0,729	0,093	0,030	0,747	0,096
680	0,809	0,731	0,102	0,035	0,747	0,102
685	0,814	0,735	0,112	0,043	0,747	0,110
690	0,819	0,739	0,125	0,056	0,747	0,123
695	0,824	0,742	0,141	0,074	0,746	0,137
700	0,828	0,746	0,161	0,097	0,746	0,152
705	0,830	0,748	0,182	0,128	0,746	0,169
710	0,831	0,749	0,203	0,166	0,745	0,188
715	0,833	0,751	0,223	0,210	0,744	0,207
720	0,835	0,753	0,242	0,257	0,743	0,226
725	0,836	0,754	0,257	0,305	0,744	0,243
730	0,836	0,755	0,270	0,354	0,745	0,260
735	0,837	0,755	0,282	0,401	0,748	0,277
740	0,838	0,755	0,292	0,446	0,750	0,294
745	0,839	0,755	0,302	0,485	0,750	0,310
750	0,839	0,756	0,310	0,520	0,749	0,325
755	0,839	0,757	0,314	0,551	0,748	0,339

760	0,839	0,758	0,317	0,577	0,748	0,353
765	0,839	0,759	0,323	0,599	0,747	0,366
770	0,839	0,759	0,330	0,618	0,747	0,379
775	0,839	0,759	0,334	0,633	0,747	0,390
780	0,839	0,759	0,338	0,645	0,747	0,399
785	0,839	0,759	0,343	0,656	0,746	0,408
790	0,839	0,759	0,348	0,666	0,746	0,416
795	0,839	0,759	0,353	0,674	0,746	0,422
800	0,839	0,759	0,359	0,680	0,746	0,428
805	0,839	0,759	0,365	0,686	0,745	0,434
810	0,838	0,758	0,372	0,691	0,745	0,439
815	0,837	0,757	0,380	0,694	0,745	0,444
820	0,837	0,757	0,388	0,697	0,745	0,448
825	0,836	0,756	0,396	0,700	0,745	0,451
830	0,836	0,756	0,403	0,702	0,745	0,454



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

КАФЕДРА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ И ЕЕ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ШКОЛА

Кафедра создавалась в 1937-38 годах и существовала под следующими названиями:

- с 1938 по 1958 год - кафедра военных оптических приборов;
- с 1958 по 1967 год - кафедра специальных оптических приборов;
- с 1967 по 1992 год - кафедра оптико-электронных приборов;
- с 1992 года - кафедра оптико-электронных приборов и систем.

Кафедру возглавляли:

- с 1938 по 1942 год - профессор К.Е. Солодилов;
- с 1942 по 1945 год - профессор А.Н. Захарьевский (по совместительству);
- с 1945 по 1946 год - профессор М.А. Резунов (по совместительству);
- с 1947 по 1972 год - профессор С.Т. Цуккерман;
- с 1972 по 1992 год - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев;
- с 1992 по 2007 год - заслуженный деятель науки РФ, профессор Э.Д. Панков.
- с 2007 года по настоящее время - почетный работник высшего профессионального образования, профессор В.В. Коротаев.

История кафедры началась в 1937-38 годах с организации в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) кафедры военных оптических приборов. Первым заведующим кафедрой был К.Е. Солодилов, до этого возглавлявший Центральное конструкторское

бюро (ЦКБ) Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности (ВООМП). Преподавателями кафедры стали сотрудники этого ЦКБ - М.А. Резунов, М.Я. Кругер, С.Т. Цуккерман, В.А. Егоров, Б.М. Кулежнов.

В годы Великой Отечественной войны кафедра была эвакуирована в Черепаново, где обязанности заведующего кафедрой выполнял профессор А.И. Захарьевский. Преподавателями кафедры по состоянию на 01.04.1945 г были профессор Чулановский, доцент Кругер, ст. преподаватель Гриневич, ассистенты Дедюлин и Погарев. После возвращения в Ленинград кафедрой в 1945-46 годах по совместительству заведовал начальник конструкторского бюро (КБ) Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (ГОИ) М.А. Резунов.

В начале 1947 года кафедру возглавил профессор С.Т. Цуккерман, который руководил ею до 1972 года. В 1958 году кафедра была реорганизована в кафедру специальных оптических приборов, а в 1967 году в кафедру оптико-электронных приборов (ОЭП).

Создание С.Т. Цуккерманом в предвоенные годы книги «Точные механизмы» (М.: Оборонгиз, 1941) является значительным вкладом в развитие отечественного точного приборостроения. С.Т. Цуккерман является автором более 120 научных работ и более 50 изобретений. В предвоенные, военные и послевоенные годы С.Т. Цуккерман работал над созданием прицельных устройств для зенитной и авиационной артиллерии. Он был одним из создателей серийного авиационного гироскопического прицела АСП с автоматической выработкой поправки на упреждение, который устанавливался на истребителях МиГ, а также механического ракурсного прицела для мелкокалиберной зенитной артиллерии, широко применяемого во время войны во Вьетнаме.

В 1958 г. при кафедре была организована отраслевая лаборатория «Специальные оптические приборы» с достаточно сильной группой конструкторов-разработчиков.

С.Т. Цуккерман и старший научный сотрудник А.С. Гридин руководили разработкой приборов управления по лучу (ПУЛ), предназначенных для управления движением различных подвижных объектов по прямой линии или по программе.

В начале 60-х годов старший научный сотрудник Г.Г. Ишанин занимался разработкой фотометрической аппаратуры, предназначенной для паспортизации оптико-электронных приборов и систем различного назначения.

Значительное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре выдающегося специалиста в области оптико-электронного приборостроения, члена-корреспондента Российской академии наук (РАН), Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской премии профессора

М.М. Мирошникова, который, работая на кафедре ОЭП с 1969 года по 1976 год в должности профессора по совместительству, поставил и читал курс «Теория оптико-электронных приборов».

С 1972 года по 1992 год кафедрой ОЭП заведовал заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев, известный специалист в области автоматических ОЭПиС в комплексах навигации и управления авиационной и космической техникой. Соответственно тематика выполнения научно-исследовательских работ на кафедре приобрела новые направления, существенно увеличилось число тем, носящих поисковый фундаментальный характер. Были разработаны новый учебный план и программы учебных дисциплин.

Л.Ф. Порфирьев является автором 19 учебников, учебных пособий и монографий, среди которых можно выделить такие как «Теория оптико-электронных приборов и систем» (Л.: Машиностроение, 1980), «Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах» (Л.: Машиностроение, 1989). Результаты его работ можно оценить как значительный вклад в разработку общей теории оптико-электронных систем.

Л.Ф. Порфирьев как руководитель проводил достаточно жесткую кадровую политику, при которой на кафедре оставались работать только те сотрудники, которые отличались преданностью делу. При этом он оказывал всемерную поддержку сотрудникам кафедры по разработке ими различных направлений теории и практики оптико-электронного приборостроения. По результатам научно-исследовательских работ в этот период защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Г.Н. Грязин (1983 г.), Е.Г. Лебедько (1985 г.), Э.Д. Панков (1986 г.), Г.Г. Ишанин (1988 г.), защищено много диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В этот период под руководством Э.Д. Панкова начали проводиться исследования по разработке новых оптико-электронных систем измерения взаимного положения разнесенных в пространстве объектов.

Г.Н. Грязин, перешедший на кафедру с радиотехнического факультета в конце 60-х годов, продолжил свои работы в области прикладного телевидения, в частности, по разработке систем наблюдения за быстродвижущимися объектами и быстропротекающими процессами.

С 1975 года заведующим отраслевой лабораторией стал старший научный сотрудник А.Н. Тимофеев, который продолжил исследования по разработке методов и средств контроля пространственного положения объектов с помощью ОЭП с оптической равносигнальной зоной для машиностроения, энергетики, строительства, судостроения и железнодорожного транспорта.

С 1975 года, после увольнения в запас, из Ленинградской военной инженерной краснознаменной академии (ЛВИКА) им. А.Ф. Можайского на

кафедру пришел работать в должности профессора С.П. Авдеев, известный специалист в области ОЭПиС космических аппаратов. Он поставил курсы и читал лекции по учебным дисциплинам «Оптико-электронные приборы», «Оптико-электронные приборы систем управления», «Оптико-электронные приборы для научных исследований».

Существенное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре лауреата Ленинской и Государственной премий профессора Б.А. Ермакова, известного специалиста в области физической оптики и оптико-электронного приборостроения. Б.А. Ермаков работал на кафедре ОЭП с 1979 года по 1992 год в должности профессора по совместительству и поставил курс «Оптико-электронные приборы с лазерами».

В 70-80 годах под руководством доцента Е.Г. Лебедько проводились исследования законов отражения лазерного излучения от нестационарных поверхностей и протяженных объектов, исследования в области теории идентификации объектов по их излучению в сложной фоновой ситуации. Создан комплекс для лазерной локации крупногабаритных морских объектов сложной конфигурации и водной поверхности. В этих работах принимали участие доценты О.П. Тимофеев и С.Б. Лукин.

В 70-90 годах под руководством Л.Ф. Порфирьева был разработан ряд астродатчиков, систем астроориентации и космической навигации (В.И. Калинин, А.Л. Андреев, С.Н. Ярышев).

С 1992 г. заведующим кафедрой является заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Э.Д. Панков. В 1992 году кафедра была переименована в кафедру оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС).

Под руководством Э.Д. Панкова в 70-90-х годах были проведены разработки ряда оптико-электронных приборов и систем специального и гражданского применения, нашедших практическое внедрение и способствующих научно-техническому прогрессу и укреплению обороноспособности нашей страны.

В частности, исследования и разработки в области линейных и угловых измерений позволили приступить к решению общей проблемы согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах с помощью оптико-электронных систем.

В рамках указанной проблемы доцентом И.А. Коняхиным проводились исследования, результаты которых можно классифицировать как разработку теории построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации.

В то же время доцентом В.В. Коротаевым разработан ряд поляризационных приборов и измерительных установок. Теоретическим результатом работ явилась разработка методологии анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией

элементов. По результатам указанных работ В.В. Коротаев (в 1997 г.) и И.А. Коняхин (в 1998г.) защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.

Применение многоэлементных приемников в системах пеленгации дало толчок развитию телевизионных систем технического зрения, измерительных телевизионных систем и систем обработки изображений. Результаты этих исследований были использованы доцентом А.Л. Андреевым при постановке учебных курсов «Оптико-электронные системы с ЭВМ», «Специализированные аппаратные и программные средства ОЭП», «Автоматизированные телевизионные вычислительные комплексы», а также доцентом С.Н. Ярышевым при постановке им в 1993 году учебной дисциплины «Видеотехника».

Указанные курсы обеспечиваются лабораторным практикумом на базе рабочих мест, оснащенных персональными компьютерами, объединенными в локальную сеть. Рабочие места оснащены аппаратными и программными средствами цифровой видеозаписи и обработки изображений. В этот период Г.Н. Грязиным были подготовлены дисциплинам: «Телевизионные системы», «Прикладное телевидение и телевизионно-вычислительные комплексы» (совместно с А.Л. Андреевым).

На основе обобщения методик расчета оптико-электронных систем различного назначения и принципа действия в 1981 году были развернуты работы по созданию элементов систем автоматизированного проектирования ОЭП. За период с 1981 по 1987 год под руководством И.А. Коняхина были разработаны оригинальные пакеты прикладных программ расчета параметров систем измерения пространственного положения объектов.

Развитие компьютерной техники и программного обеспечения общего назначения позволило создать проблемно-ориентированное программное обеспечение поддержки проектирования ОЭП на системотехническом уровне.

По результатам научных работ сотрудниками кафедры ОЭПиС выпущено в свет 15 монографий, 11 учебников и учебных пособий. На кафедре подготовлено 14 докторов наук, а также более 110 кандидатов наук.

На разработки кафедры получены авторские свидетельства СССР и патенты Российской Федерации на более чем 200 изобретений. Наибольший вклад в изобретательскую деятельность внес Э.Д. Панков - автор 123 изобретений, из которых 33 внедрены в промышленности.

При заявлении научно-педагогической школы «Оптико-электронное приборостроение» в 2009 году были сформулированы следующие основные научно-технические результаты, достигнутые в период с 1938 по 2009 годы:

– разработаны принципы построения военных оптико-механических приборов;

- разработаны принципы построения точных механизмов;
- разработаны принципы построения оптико-электронных приборов с оптической равносигнальной зоной;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения оптико-электронных приборов;
- разработаны методы описания импульсных сигналов, идентификации и классификации объектов в системах нестационарной лазерной локации;
- разработаны теория, принципы построения и методы расчета импульсных телевизионных систем наблюдения быстродвижущихся объектов;
- обнаружен термоупругий эффект в кристаллическом кварце и создан новый тип приемников оптического излучения;
- разработана теория построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- разработана методология анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией элементов;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения измерительных систем на основе матричных фотопреобразователей;
- разработаны основы построения ОЭС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах.

Основоположники научной школы:

- Солодилов Константин Евгеньевич, заведующий кафедрой с 1938 г. по 1942 г., профессор;
- Цуккерман Семен Тобиасович, заведующий кафедрой с 1947 г. по 1972 г., профессор;
- Мирошников Михаил Михайлович, директор ГОИ, д.т.н., профессор, профессор кафедры ОЭП с 1967 г. по 1978 г.; член-корреспондент Российской Академии наук, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии.
- Порфирьев Леонид Федорович, заведующий кафедрой с 1972 г. по 1992 г., д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР.
- С 2007 г. заведующим кафедрой является почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, профессор В.В. Коротаев.

На кафедре была открыта подготовка по новой специализации инженеров «Оптико-электронные приборы и системы обработки видеoinформации» и новая магистерская программа «Оптико-электронные методы и средства обработки видеoinформации».

В 2007 году был создан научно-образовательный центр оптико-электронного приборостроения (НОЦ ОЭП).

Научно-образовательный центр оптико-электронного приборостроения выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию видеоинформационных и информационно-измерительных приборов различного назначения, высокоточных приборов для измерения линейных, угловых и других физических величин в промышленности, энергетике, на транспорте, а также систем технического зрения и обработки видеоинформации. К выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ широко привлекаются студенты, аспиранты, молодые специалисты, молодые кандидаты наук. Научно-образовательный центр является активным участником Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Направления научных исследований кафедры ОЭПиС в 2007-2012 годах

Развитие теоретических основ и принципов построения оптико-электронных приборов и систем, в том числе:

- видеоинформационных измерительных систем;
- видеоинформационных систем наблюдения;
- видеоинформационных импульсных систем наблюдения быстро движущихся объектов;
- комплексированных телевизионно-тепловизионных систем наблюдения,
- ОЭПиС обеспечения техносферной безопасности;
- ОЭПиС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах;
- автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- ОЭПиС цветового и спектрального анализа объектов;
- фотометрических систем аттестации ОЭПиС, источников и приемников оптического излучения;
- систем лазерной локации с нестационарным облучением;
- ОЭС сепарации полезных ископаемых.

По результатам исследований в этот период на кафедре были защищены 14 диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Идет активное пополнение преподавательского состава молодыми кандидатами наук. В настоящее время на кафедре работает 7 кандидатов наук в возрасте до 35 лет.

Мы занимаемся разработкой оптико-электронных приборов и систем в целом:

- системотехническое проектирование,
- разработка (выбор) оптической системы,

- разработка конструкции,
- разработка (выбор) электроники и средств обработки информации,
- разработка программного обеспечения,
- сборка, юстировка, настройка и испытания.

Мы учим тому, что сами умеем делать!

По итогам конкурсов ведущих научно-педагогических коллективов СПб НИУ ИТМО 2007-2011 годов кафедра занимала призовые места.

С 2011 года подготовка бакалавров, магистров и специалистов на кафедре ОЭПиС осуществляется по Федеральным государственным образовательным стандартам третьего поколения (ФГОС).

Подготовка бакалавров по направлению:

200400 «Оптехника» (профиль - Оптико-электронные приборы и системы). Срок обучения - 4 года

Подготовка магистров по направлению:

200400 Оптехника.

Магистерские программы:

– Оптико-электронные методы и средства обработки видеoinформации

– Оптико-электронные приборы и системы безопасности

Срок обучения – 2 года.

Подготовка инженеров по специальности:

200401 -Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения.

Специализация:

– Оптико-электронные информационно-измерительные приборы и системы. Срок обучения – 5,5 лет.

Подробная информация о кафедре ОЭПиС имеется на сайте кафедры:
<http://oeps.ifmo.ru/>

Горбунова Е.В., Чертов А.Н.
ТИПОВЫЕ РАСЧЕТЫ ПО КОЛОРИМЕТРИИ
ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО

Зав. РИО

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Горбунова Е.В.,
Чертов А.Н.

Н.Ф. Гусарова

100 экз.

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского национального
исследовательского университета
информационных технологий, механики
и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

