

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
«МЭИ»**

Институт ИРЭ ЭТФ Кафедра Светотехника
Направление Электроника и наноэлектроника

**ЗАДАНИЕ НА МАГИСТЕРСКУЮ
ДИССЕРТАЦИЮ**

по программе подготовки магистров Теоретическая и
прикладная светотехника 210100

Тема: «Модернизация фотоэлектрического колориметра»

Время выполнения работы с 20 сентября 2012 по 10 июня 2014

Студент Дмитриева И. А. ЭР-04-08
Фамилия, и., о. группа подпись

Научный руководитель доцент , Петров В.М.
должность, звание, фамилия, и., о. подпись

Консультант _____
должность, звание, фамилия, и., о.

Зав. кафедрой к.т.н., Боос Г. В.
звание, фамилия, и., о., подпись, дата утверждения задания

Место выполнения научной работы НИУ «МЭИ» (ТУ) кафедра «Светотехника»

1.Обоснование выбора темы диссертационной работы

Измерение цвета является одной из наиболее актуальных задач в современной светотехнике. Цвет измеряют при контроле промышленной продукции, при оценке качества воспроизведения цветных изображений в кино, фотографии и телевидении. С массовым внедрением светодиодов в систему общего освещения, с развитием новых типов жидкокристаллических и плазменных экранов, это вопрос встал как никогда остро.

Для студентов, обучающихся на кафедре светотехники, важно понимать принципы измерения цвета, знать способы реализации измерения цвета в различных приборах. На кафедре светотехники МЭИ в составе лабораторного практикума по фотометрии есть работа, посвященная цветовым измерениям на базе трехфильтрового фотоэлектрического колориметра конструкции ВЭИ.

Самым большим недостатком действующей модели колориметра является использование селенового фотоэлемента в качестве приемника излучения. Селеновые фотоэлементы морально устарели, так как по сравнению с большинством современных приемников у них неудовлетворительная линейность световой характеристики, высокая утомляемость, низкое быстродействие, большая чувствительность к температуре окружающей среды. Также в приборе используется метод воспроизведения кривой $\bar{x}(\lambda)$, не получивший широкого распространения, поэтому необходимо заменить его на более современный метод.

Научный руководитель Петров В.М. дата _____

Студент Дмитриева И.А. дата _____

2.Консультации по разделу

Подпись консультанта _____ дата _____

3.Консультации по разделу

Подпись консультанта _____ дата _____

4. План работы над магистерской диссертацией

№ п\п	Содержание разделов	Срок выполнения	Трудоёмкость в %
I	Теоретическая часть Обзор тематической литературы	20.09.2012 – 10.04.2013	10%
II	Анализ существующих экспериментальных данных Сбор результатов аналогичных экспериментов	14.01.2013- 10.04.2013	5%
III	Расчетная часть Определение алгоритма главной расчетной программы Написание главной расчетной программы в среде MATLAB Отладка программы, написание вспомогательных программ Анализ полученных результатов	15.04.2013 - 18.05.2013 7.09.2013 – 9.11.2013 20.01.2014- 7.03.2014 15.03.2014- 25.04.2014	10% 20% 25% 20%
IV	Оформление диссертации Написание и оформление диссертации.	1.05.2014 – 10.06.2014	10%

5. Рекомендуемая литература

1. **Кривошеев М.И.**, Кустарев А.К., Цветовые измерения, М.: Энергоатомиздат, 1990
2. **Мешков В.В.**, Матвеев А.Б., Основы светотехники, ч.2, М.: Энергоатомиздат, 1989
3. **Гордов А.Н.** Основы пирометрии, М.: Издательство «Металлургия», 1971
4. **Гуревич М.М.**, Цвет и его измерение, М. – Л., 1950
5. **Петров В.М.**, Шестопалова И.П., Меламед О.П., Цветовые измерения, лабораторные работы, «Измерение цвета с помощью фотоэлектрического колориметра» М.: Издательский дом МЭИ, 2007

6. Краткие сведения о студенте:

Домашний адрес Московская область, г. Жуковский, ул. Горького, д.6, кв.14

Телефон служебный _____ домашний _____

Примечание: задание брошюруется вместе с диссертацией и с отзывами руководителя и рецензентов.

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	8
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	9
ВВЕДЕНИЕ.....	10
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	13
1.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТА	13
1.2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТА	18
1.3. ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	31
1.4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	36
2. ВЫБОР МЕТОДА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ КРИВЫХ СЛОЖЕНИЯ	37
2.1. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ.....	37
2.2. ОЦЕНКА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ.....	42
2.2.1. МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ F_1	44
3. ПОГРЕШНОСТЬ КОРРЕКЦИИ ПОД УДЕЛЬНЫЕ КООРДИНАТЫ ЦВЕТА.....	50
3.1. РАСЧЕТ Y – СВЕТОФИЛЬТРА	54
3.2. РАСЧЕТ Z – СВЕТОФИЛЬТРА.....	58
3.3. РАСЧЕТ XPR - СВЕТОФИЛЬТРА	60
3.4. СРАВНЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ	62
4. ОЦЕНКА ИТОГОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ.....	65
5. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ИТОГОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ.....	69
6. РАСЧЕТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПИРОМЕТРА	80
7. ГРАДУИРОВКА КОЛОРИМЕТРА.....	86
8. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КОНСТРУКЦИИ ПРИБОРА	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	96

АННОТАЦИЯ

Отчет с. 91, рис. 38, табл. 6, источн.27

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОЛОРИМЕТР, ПОГРЕШНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ, СВЕТОФИЛЬТРЫ, ЦВЕТОВОЕ СМЕЩЕНИЕ, ЭЛЛИПСЫ МАК-АДАМА, ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Объектом модернизации является фотоэлектрический колориметр, действующий в лаборатории фотометрии на кафедре светотехники НИУ МЭИ.

Цель работы – замена элементной базы колориметра на более совершенную и использование более современного метода спектральной коррекции. Был изменен метод воспроизведения требуемых кривых сложения, в частности, $\bar{x}(\lambda)$, и оценена возникающая при этом методическая погрешность. Произведены расчеты светофильтров для коррекции под кривые сложения МКО 1931 г., оценена погрешность, спектральной коррекции. Значения цветовых смещений, возникающих из-за погрешностей, нанесены на цветовой график МКО 1967 г. с обозначенными на ней эллипсами Мак-Адама. Предложен новый способ измерения цветовой температуры излучения, произведено сравнение с существующим способом.

Сделаны предложения по конструкции колориметра.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

МКО – Международная комиссия по освещению

ПИ – приемник излучения

ПЗС – прибор с зарядовой связью

СПЭЯ – спектральная плотность энергетической яркости

СПСИ – спектральная плотность силы излучения

СФ – светофильтр

КСФ – корректирующий светофильтр

ПНТ – преобразователь тока в напряжение

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

ФД – фотодиод

УФ – ультрафиолетовая (область)

ИК – инфракрасная (область)

СД – светодиод

ЦТ – цветовая температура

КТЦ – коррелированная цветовая температура

НЛВД – натриевая лампа высокого давления

МГЛ – металлогалогенная лампа

РЛВД – ртутная лампа высокого давления

РЗМ – редкоземельные (металлы)

ЛЛ – люминесцентная лампа

ИС – источник света

ВВЕДЕНИЕ

В современной науке и технике все большую актуальность приобретает измерение цвета. Область применения цветовых измерений постоянно расширяется. Цвет измеряют при контроле разнообразной промышленной продукции, при оценке качества воспроизведения цветных изображений в кино, фотографии и телевидении. С развитием технологии жидкокристаллических и светодиодных дисплеев, с массовым внедрением светодиодов в общее освещение этот вопрос встал особенно остро.

Существует множество способов измерения цвета, как и приборов для решения поставленной задачи. На кафедре светотехники МЭИ в составе лабораторного практикума по фотометрии есть работа, посвященная цветовым измерениям на базе трехфильтрового фотоэлектрического колориметра конструкции ВЭИ.

Самым большим недостатком действующей модели колориметра является использование селенового фотоэлемента в качестве приемника излучения. Он имеет максимум спектральной чувствительности в области наибольшей спектральной чувствительности человеческого глаза ($0.5 - 0.55$ мкм) и под него достаточно легко подобрать корректирующие светофильтры для кривой $\bar{y}(\lambda)$ (она совпадает с $\bar{v}(\lambda)$). Но селеновые фотоэлементы морально устарели, так как по сравнению с большинством современных приемников у них неудовлетворительная линейность световой характеристики, высокая утомляемость, низкое быстродействие, большая чувствительность к температуре окружающей среды.

В колориметре реализуется метод воспроизведения кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$ с помощью линейной комбинации функций сложения. В результате замены вместо кривой $\bar{x}(\lambda)$ с двумя максимумами появляется кривая с одним максимумом в области наибольшей чувствительности приемника излучения. Под такую кривую можно с меньшей погрешностью подобрать

корректирующие светофильтры, и координаты измеряемого цвета могут быть выражены через фототоки приемника простыми линейными зависимостями.

Описанный метод воспроизведения не получил широкого распространения в России и за рубежом. Более современным (хотя и не единственным) является метод замены левой ветви $\bar{x}(\lambda)$ на $k * \bar{z}(\lambda)$, где k - масштабирующий коэффициент. Замена позволяет измерить все координаты цвета с помощью трех светофильтров и трех приемников излучения (либо одним приемником излучения в случае одноканального прибора), уменьшить время измерения по сравнению с, например, четырехфильтровым колориметром. Однако любая нелинейная замена вносит определенную погрешность в результат, и ее необходимо оценить.

Чтобы существующий колориметр на кафедре светотехники НИУ МЭИ отвечал современным требованиям к фотоэлектрическим колориметрам, его нужно модернизировать. В данной работе была произведена замена приемника излучения на кремниевый фотодиод. Изменен метод воспроизведения кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$, произведена оценка возникающей методической погрешности и погрешности спектральной коррекции. Эти погрешности сами по себе несут слишком мало информации для пользователя, поэтому немалая часть данной работы посвящена переводу возникающих погрешностей в пространство CIELUV 1976 года с пороговыми эллипсами Мак-Адама. Таким образом, появляется возможность оценить, будет ли возникающая погрешность излучения приводить к разнице в визуальном восприятии цвета.

Колориметр на кафедре светотехники НИУ МЭИ также предоставляет возможность определения цветовой температуры излучения (если его спектр близок к спектру абсолютно черного тела или серого тела и описывается законом Планка) с использованием так называемого «сине-красного» отношения. Имеется в виду отношение токов, которые измеряются после прохождения излучения через, соответственно, синий и красный

светофильтр. Эти светофильтры подобраны особым образом, так, чтобы располагаться по краям видимого спектра. Такая методика измерения цветовой температуры и причины выбора именно синего и красного светофильтров будет описана в разделе 1.3 литературного обзора.

Таким образом, в исходном приборе используется пять светофильтров. В данной работе с целью усовершенствования прибора проанализирована возможность использования в качестве «красного» и «синего» светофильтров наборы стекол для коррекции под правую часть $\bar{x}(\lambda)$ («красный» светофильтр) и $\bar{z}(\lambda)$ («синий» светофильтр) соответственно. Рассчитана пирометрическая чувствительность такого прибора.

В связи с возможным использованием трехканального колориметра вместо существующего одноканального прибора, приведены основные предложения по конструкции нового колориметра. Сформулированы требования к чувствительности регистрирующего устройства.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТА

Измерить цвет – значит выразить его через какие-то величины, определить его место во всем множестве возможных цветов с помощью математических выражений. Любой цвет может быть полностью охарактеризован спектральным распределением излучения, однако нельзя использовать только его для описания цвета. Связь цвета с излучением не является взаимно однозначной [1].

Любой цвет можно представить вектором в цветовом пространстве. Вектор цвета исследуемого излучения можно выразить цветовым уравнением, записанным в векторной форме, приняв основные цвета MNP за единичные векторы \bar{M} , \bar{N} , \bar{P} основных цветов системы:

$$\bar{F} = M * \bar{M} + N * \bar{N} + P * \bar{P} \quad (1)$$

Единичные вектора любой системы рекомендуется направлять по координатным осям трехмерного пространства, в котором расположено все множество векторов цвета. Начало каждого цветового вектора приходится на начало координат данной системы. Проекции конца цветового вектора на координатные оси называются *координатами цвета*. *Координаты цветности* – это расстояния от сторон координатного треугольника MNP , образованного следами пересечения плоскости единичных цветов с координатными плоскостями системы:

$$m = \frac{M}{M + N + P} \quad (2)$$

Существует множество колориметрических систем, каждая из которых обладает своими достоинствами и недостатками. Так называемая физиологическая колориметрическая система КЗС построена на кривых чувствительности трех типов колбочек глаза человека. Также существует система RGB , широко используемая, например, в юстировке мониторов компьютеров. Стоит подробно рассмотреть международную систему XYZ

1931 года, так как именно в ней проводится большая часть дальнейшего исследования.

Система XYZ рекомендована VIII сессией МКО, в ее основу положены следующие условия:

- Координаты цветности всех реальных цветов должны лежать внутри координатного треугольника, т.е. все реальные цвета должны иметь только положительные координаты;

- Количественная характеристика должна полностью определяться одним компонентом (Y);

- Координаты белого равноэнергетического излучения должны лежать в центре тяжести цветового треугольника.

Удельные (на единицу энергетической яркости) координаты цвета монохроматических излучений в системе XYZ имеют вид:

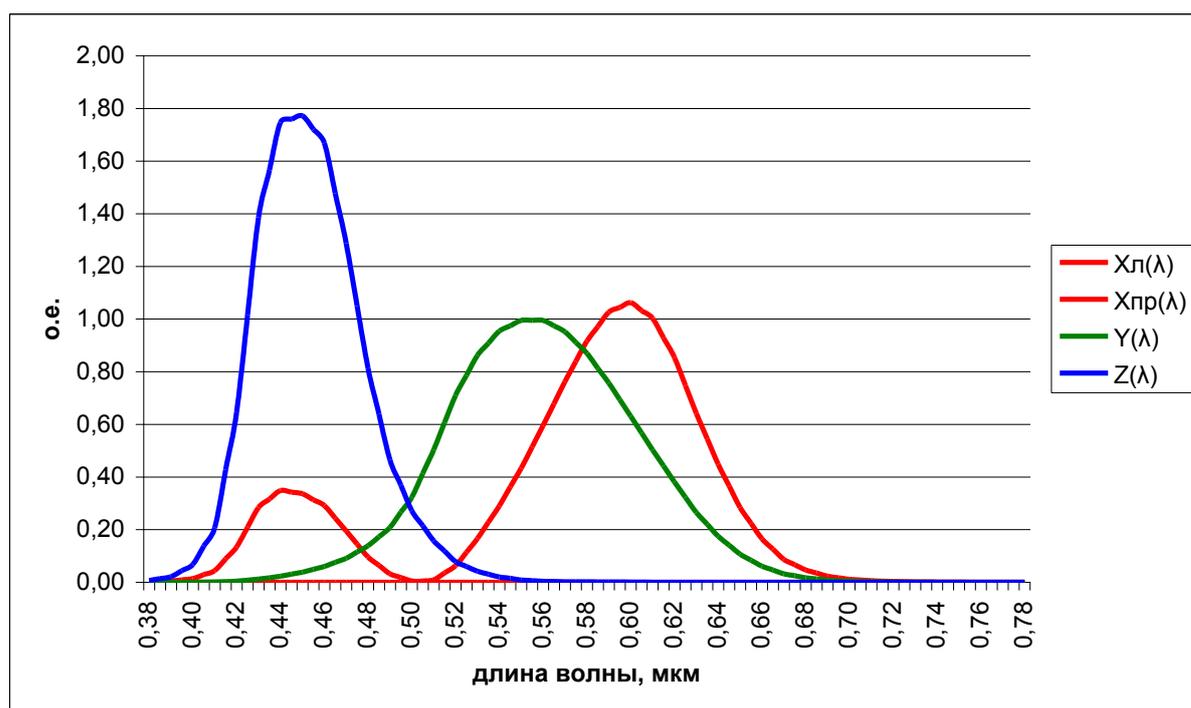


Рис.1 Удельные координаты цвета системы XYZ (кривые сложения)

Количественная характеристика цвета, в соответствии со вторым условием существования системы XYZ , определяется следующим выражением:

$$L = 683 * Y \quad (3)$$

Колориметрические системы *RGB*, *XYZ* дают возможность идентифицировать цвет при помощи координат цвета, однако оценить визуальное различие между двумя цветами в количественной мере эти системы не позволяют. Вопросы опеределения в количественной мере цветовых различий относятся, по Е. Шредингеру, к области высшей метрики цвета [1].

Два излучения, имеющие различные координаты цвета, воспринимаются глазом как разноцветные, если разница в цвете равна или больше порога цветоразличения. Пороговую разность цвета можно представить в колориметрическом пространстве в виде расстояния между концами векторов цвух цветов, различаемых с заданной вероятностью.

Как доказал Е. Шредингер [13], геометрическим местом точек в цветовом пространстве, удаленных от заданного цвета на один порог, является эллипсоид. Первая равноконтрастная диаграмма, основанная на трансформации колориметрического графика МКО 1931, была создана Д. Джаддом на основе анализа распределения цветовых порогов реальных цветов на графике МКО 1931. Им также было доказано, что размеры эллипсов цветовых порогов и их ориентация на цветовом графике различны для разных цветностей.

Фундаментальные исследования порогов цветоразличения провел Мак-Адам [14]. Исследования проводились для 25 реальных цветов, представленными в цветовом пространстве 25 точками, более-менее равномерно заполнившими поле реальных цветов. Измерения проводились при постоянной яркости полей сравнения 48 кд/м^2 на нейтральном фоне с яркостью 24 кд/м^2 . Результаты были представлены в виде 25 эллипсов ошибок установления колориметрического тождества полей сравнения одним наблюдателем. Тщательность измерения и стабильность эксперимента позволили Мак-Адаму получить данные, считающиеся до настоящего времени максимально достоверными.

В 1967 году была разработана модификация равноконтрастной системы, которую МКО рекомендовала для оценки цветовых различий. В основу определения различий по цветности был взят график Мак-Адама, в плоскости которого располагаются цвета одинаковой яркости. Перпендикулярно этой плоскости через точку белого цвета проходит ось светлот – ахроматическая ось. В результате различных преобразований графика Мак Адама равноконтрастное пространство *CIELUV* описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 * \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_{\bar{b}}}} - 16 \\
 u^* &= 13L^*(u' - u'_{\bar{b}}) \\
 v^* &= 13L^*(v' - v'_{\bar{b}})
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где

$$\begin{aligned}
 u' &= \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \\
 v' &= \frac{9y}{-2x + 12y + 3}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$Y, Y_{\bar{b}}$ – координаты исследуемого и белого цветов в системе МКО 1931;
 $u', v', u'_{\bar{b}}, v'_{\bar{b}}$ - координаты цветности исследуемого и белых цветов в модифицированной системе Мак-Адама.

В этой системе не находят отражения многие физиологические эффекты зрения (Гельмольца-Кольрауша, Бецольца-Брюкке). Как и всем равноконтрастным системам, построенным на линейных трансформациях, этой системе присущи многие недостатки – как видно на рис. 2, эллипсы Мак-Адама на сечении пространства цветовых ощущений плоскостью равной яркости преобразуются в кривые, мало похожие на равновеликие окружности [1].

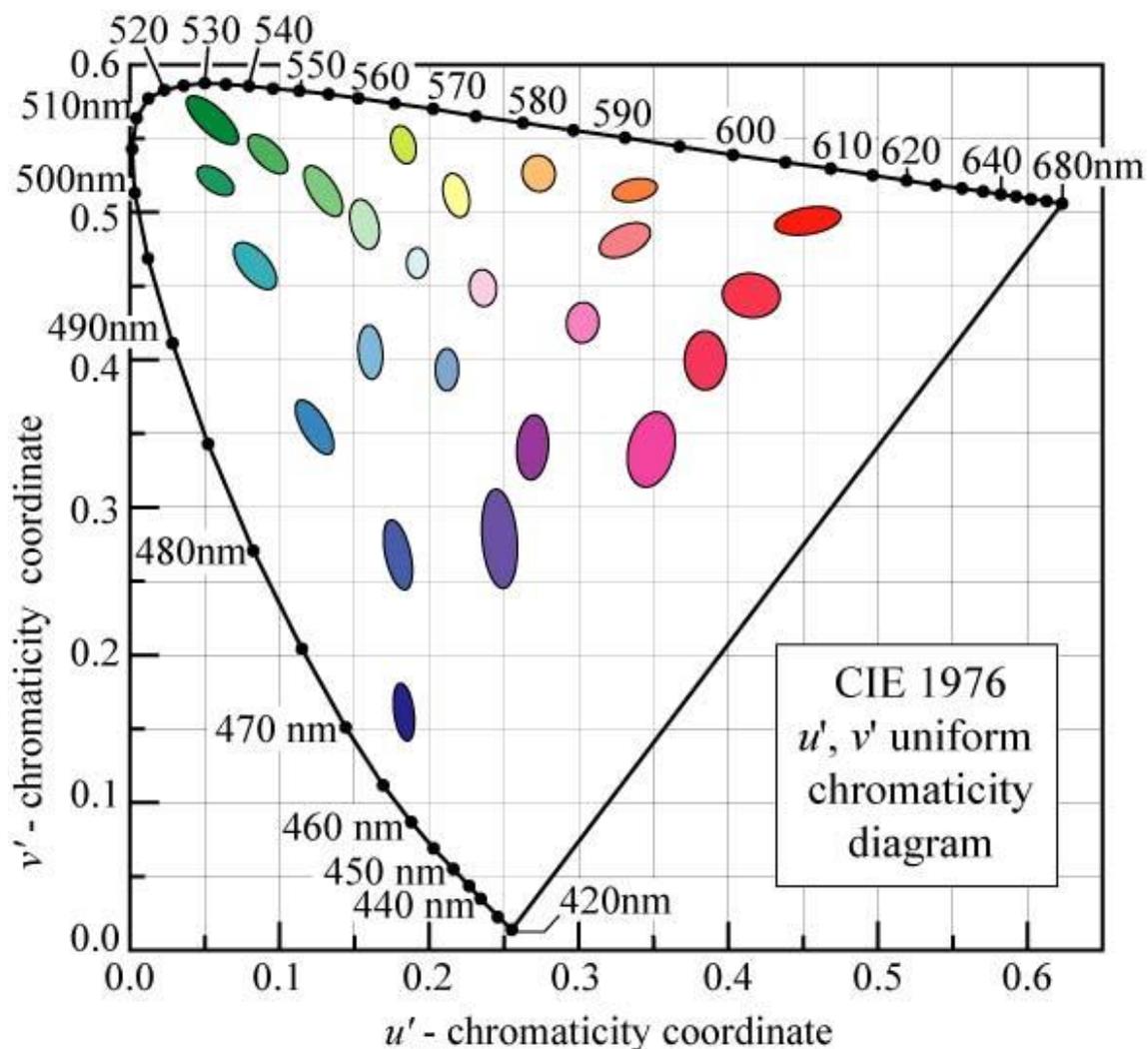


Рис. 2 Пороговые эллипсы Мак-Адама на плоскости равной яркости в системе *CIELUV*

Тем не менее, для целей данной работы такой формальный подход, не учитывающий психофизиологические эффекты, вполне допустим, так как стоит задача оценки возникающей погрешности в цветовых порогах, а для этого не нужна сверхвысокая точность.

Для измерения цвета используются различные приборы. Принципы их работы изложены далее.

1.2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТА

Приборы для измерения цвета можно разделить на две группы – спектроколориметры и интегральные колориметры.

Спектроколориметры

Спектроколориметр в составе имеет три важных элемента – монохроматор, приемник излучения и микропроцессор. Монохроматор выделяет пучок лучей малой спектральной ширины, который можно считать условно монохроматичным. Далее происходит сканирование спектра излучения и измеряется СПЭЯ или СПСИ. На выходе монохроматора стоит приемник излучения (например, фотодиод), который реагирует на облученность, создаваемую монохроматором на каждой длине волны, и дает соответствующий сигнал измерительному прибору [5].

Во многих современных приборах (спектрометрах, полихроматорах) вместо монохроматора с выходной щелью и ПИ используется спектрограф, в котором вместо выходной щели в фокальной плоскости расположен многоэлементный ПИ – фотодиодная линейка или ПЗС матрица. Возможен вариант с набором узкополосных фильтров вместо монохроматора, позволяющих получать условно монохроматическое излучение.

При помощи микропроцессорного блока результаты обрабатываются, и на выходе пользователь получает координаты цвета, цветности исследуемого излучения в системе XYZ, а также значения яркости объекта. Имеется возможность определения коррелированной цветовой температуры.

Из зарубежных приборов в колориметрической практике часто используются спектроколориметры LICO-500, Spectroguide (Германия), MiniScan XE Plus и MiniScan EZ (США). Особое место по качественным показателям занимают спектроколориметры фирмы KONICA MINOLTA (Япония). Их спектроколориметры делятся на лабораторные (Bench Top) и переносные, для использования в производстве, в магазинах (Portable).

Из приборов для лабораторных исследований в первую очередь выделяют прибор **СМ-5** [2] (рис. 3). Он является классическим представителем современных спектрофотометров, может использоваться для определения координат цветности и цветовых сдвигов для несамосветящихся объектов (цветные образцы, растворы, гранулы), имеет высокую точность измерений. Разложение белого света в спектр осуществляется плоской дифракционной решеткой.



Рис. 3 Спектрофотометр СМ-5

В качестве фотоприемного устройства используется двойная линейка кремниевых фотодиодов (2*40 элементов). В качестве осветителя образцов используется интегрирующая сфера с импульсной ксеноновой лампой (лампа примерно воспроизводит спектр D65). Условия освещения/наблюдения – d/8 (отражающий образец) и d/0 (пропускающий образец).

Процесс измерения координат цветности цветного образца происходит так:

1) Поток ксеноновой лампы отражается внутренней поверхностью интегрирующей сферы (фотометрического шара) осветителя и равномерно освещает образец;

2) Свет, отраженный от образца и непосредственно от поверхности сферы, распространяется по 2 оптоволоконным каналам и после разложения в спектр дифракционной решеткой падает на разные фотодиодные линейки.

Определение спектральных характеристик образцов производится путём их сравнения с эталонным образцом, используемым при калибровке прибора. Сравнение сигналов второй линейки при работе с измеряемым и эталонными образцами позволяет учитывать изменение спектра излучения лампы при соответствующих вспышках.

3) Сигнал попадает на 2 независимые линейки фотодиодов, причем свет в диапазоне от 340 до 740 нм делится на 40 площадок по 10 нм (на каждый фотодиод попадает свет в пределах 10 нм), и в аналоговый преобразователь подается сигнал, пропорциональный интенсивности излучения на данном отрезке оптического диапазона. Далее информация обрабатывается с помощью микропроцессора и преобразуется в результаты, которые можно получить в системах: L^*a^*b , L^*C^*h , Hunter Lab, Yxy, XYZ, Munsell.

Описание других спектроколориметров компании KONICA MINOLTA можно найти на сайте [22].

Колориметры

Колориметры по принципу действия разделяются на визуальные и фотоэлектрические.

Визуальные колориметры

Хотя в данной работе не исследуются приборы, результаты измерений которых зависят от зрительной работы человека, необходимо кратко описать принцип их действия. Он заключается в том, что наблюдатель, опираясь на свои зрительные ощущения, сравнивает два цветовых поля. Одно из полей сравнения, как правило (в колориметре Дональдсона, например), представляет собой внутреннюю стенку интегрирующего шара, которая освещается известной лампой колориметра через светофильтры K,3,C. Цветность и яркость этого поля регулируется заслонками, перекрывающими эти светофильтры, а заслонки связаны со шкалами, отсчеты по которым определяют площади раскрытия диафрагм перед светофильтрами. Второе

поле сравнения колориметра образовано белым экраном, освещаемым исследуемым источником света Л2 или комбинацией «исследуемый светофильтр-лампа с известным спектром излучения». Для каждого колориметра характерна своя система перевода отсчетов по шкалам открытия диафрагм перед светофильтрами в координаты цвета исследуемого источника/цветного образца.

Фотоэлектрический колориметр

Фотоэлектрический колориметр в конструкции не содержит поля сравнения, сигналы регистрируются с помощью фотоэлемента. Фотоэлектрический колориметр позволяет получить более точные результаты, чем визуальный, поскольку исключает человеческий фактор и особенности работы органа зрения. Для того чтобы фототок был пропорционален координатам цвета, необходимо, чтобы кривая чувствительности фотоэлемента (фотодиода) совпадала с удельными координатами цветности [4]:

$$\begin{aligned}
 S_x(\lambda) &= a_x \bar{x}(\lambda), \\
 S_y(\lambda) &= a_y \bar{y}(\lambda), \\
 S_z(\lambda) &= a_z \bar{z}(\lambda),
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

В существующих фотоэлементах это невозможно, поэтому выполняется спектральная коррекция с помощью набора светофильтров или с помощью спектральных шаблонов (масок). Исправляющие светофильтры должны удовлетворять условию:

$$\begin{aligned}
 \tau_x(\lambda) &= a_x \frac{\bar{x}(\lambda)}{S(\lambda)}, \\
 \tau_y(\lambda) &= a_y \frac{\bar{y}(\lambda)}{S(\lambda)}, \\
 \tau_z(\lambda) &= a_z \frac{\bar{z}(\lambda)}{S(\lambda)}.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Такое условие вводится для того, чтобы реакция приемника была пропорциональна соответствующей координате цвета:

$$\begin{aligned}
 i_x &= \int \varphi(\lambda) S_x(\lambda) d\lambda = a_x \int \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda = a_x X \\
 i_y &= \int \varphi(\lambda) S_y(\lambda) d\lambda = a_y \int \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda = a_y Y \\
 i_z &= \int \varphi(\lambda) S_z(\lambda) d\lambda = a_z \int \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda = a_z Z
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Спектральная коррекция светофильтрами, по терминологии авторов книги М.И.Кривошеева и А.К.Кустарева, называется спектральным согласованием. Используя полученные значения фототока, а также градуировочные коэффициенты, можно рассчитать координаты цвета и цветности.

Спектрально согласованные фотоэлектрические колориметры могут быть трехканальными (одновременного действия) и одноканальными (поочередного действия), рис. 4.

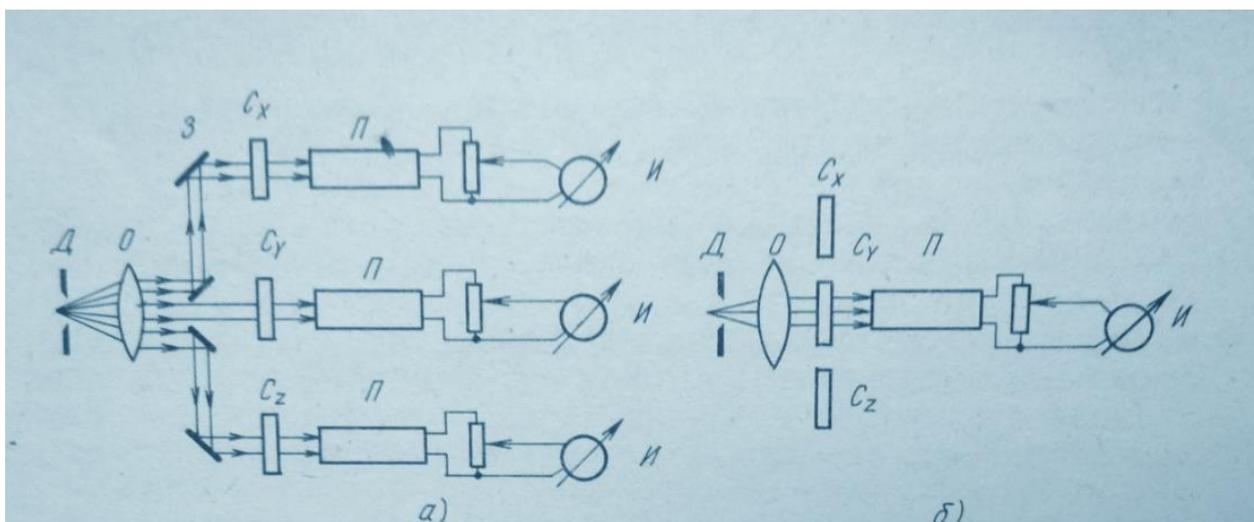


Рис.4 Принцип действия фотоэлектрического колориметра одновременного (а) и поочередного (б) действия

Трехканальные колориметры позволяют ускорить процесс измерения, что особенно важно при измерении цвета нестабильных источников (например, кинескопов). Однако перед каждым использованием требуется проверка градуировки, чтобы скомпенсировать возможные изменения интегральной чувствительности трех приемников излучения. В одноканальном колориметре это не обязательно, так как изменение интегральной чувствительности приемника излучения может сказаться лишь на точности измерений абсолютных значений координат цвета (яркости).

Оно не отразится на результатах измерений координат цветности [4], что и является целью работы с колориметрами. Здесь важна стабильность чувствительности в течение одного измерения, которая обычно обеспечивается.

Трехканальные колориметры, по сравнению с колориметрами поочередного действия, обходятся дороже из-за большего количества фотоэлементов, блоков обработки сигнала и каналов его передачи [4].

В современных колориметрах обработка полученных значений фототока производится автоматически, с помощью встроенного микропроцессора. Существует возможность получения дополнительной информации – яркость, количество цветовых порогов, пересчет в другие системы, например, CIELAB, и так далее. Современные колориметры легки, просты в использовании, компактны.

В качестве классического примера можно рассмотреть колориметр фирмы KONICA MINOLTA (Япония): Chroma Meter CS 100A [6].



Рис. 5 Chroma Meter CS 100 A

Колориметр является бесконтактным, малогабаритным, удобным в обращении измерительным прибором, используемым в лабораторных и производственных условиях.

Оптическая система колориметра Chroma Meter CS-100A формирует увеличенное изображение поля поиска с четко маркируемым одноградусным полем измерения в центре. Оптическая схема с фокусируемым объективом (Objective lens) напоминает схему яркомера (рис.6). Она предназначена для того, чтобы источники света, расположенные вне поля измерения, не могли оказывать влияние на результат измерений.

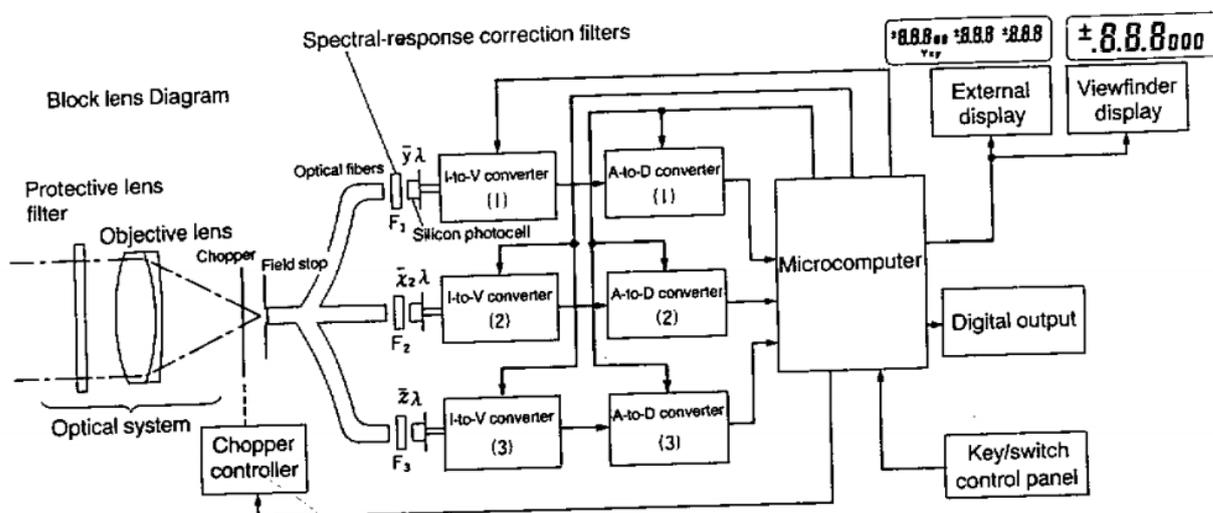


Рис.6 Принципиальная схема колориметра Chroma Meter CS-100A

По принципу действия колориметр Chroma Meter CS-100A - это три высокочувствительных кремниевых фотодиода с корректирующими светофильтрами, которые воспроизводят кривые сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. За полевой диафрагмой расположен торец световода, который разводит излучение на три одинаковых канала, выходящих на корректирующие светофильтры. После каждого фотодиода расположен ПТН (I-to-U converter), обеспечивающий линейность световой характеристики, после него – АЦП (A-to-D converter), который преобразует непрерывный сигнал в дискретный цифровой. После АЦП три канала выходят на микропроцессор, который обрабатывает результаты измерений и выводит их на дисплей. Результаты

измерения: координаты цветности x , y и яркость Y выведены на большой LCD-дисплей; яркость дополнительно выводится в видоискателе.

Дополнительную информацию о колориметре Chroma Meter CS-100A, а также о других колориметрах компании KONICA MINOLTA можно получить на сайте [23].

Некоторые колориметры имеют иной принцип спектрального согласования. Самыми известными колориметрами этого класса являются колориметры компании LMT (Германия). Они отличаются от колориметров компании MINOLTA по принципу спектральной коррекции: если в рассмотренных выше приборах использовались комбинации последовательно расположенных светофильтров, то в приборах LMT используются так называемые парциальные светофильтры – около 20 параллельно работающих светофильтров. Это ведет к ощутимому повышению цены, однако обеспечивает отличное качество коррекции. Приборы подойдут для высокоточных лабораторных исследований, но для измерений в промышленности и производстве их применение экономически не оправдано. В качестве классического примера ниже рассматриваются технические характеристики колориметра LMT Colormeter C 1210 [7] (рис. 7).



Рис. 7 Внешний вид колориметра LMT Colormeter C 1210

Характеристики:

- 1) Трехцветной колориметр с микропроцессорным управлением;
- 2) 6 диапазонов измерения, три дисплея для XYZ и x y Y ;
- 3) Разрешение (последний разряд) 0,001 лк в Y -канале;
- 4) В колориметре используется фотоголовка СН 60, которая с помощью парциальных светофильтров хорошо приспособлена для спектральной

коррекции под соответствующие функции $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$;

5) Диаметр светочувствительной поверхности 60 мм,

встроенное термостатирующее устройство;

6) Калибровка, поверка по РТВ стандарт, с сертификатом калибровки LMT;

7) Отдельный протокол по спектральной чувствительности;

8) Питание 115 В, 230 В, 50-60 Гц.

Для ознакомления с другими колориметрами компании LMT можно перейти по ссылке [24].

Модернизируемый колориметр на кафедре светотехники НИУ МЭИ относится к фотоэлектрическим одноканальным колориметрам. Измерения цветности и цветовой температуры проводятся на трехфильтровом колориметре конструкции ВЭИ [8], схема которого представлена на рис.8.

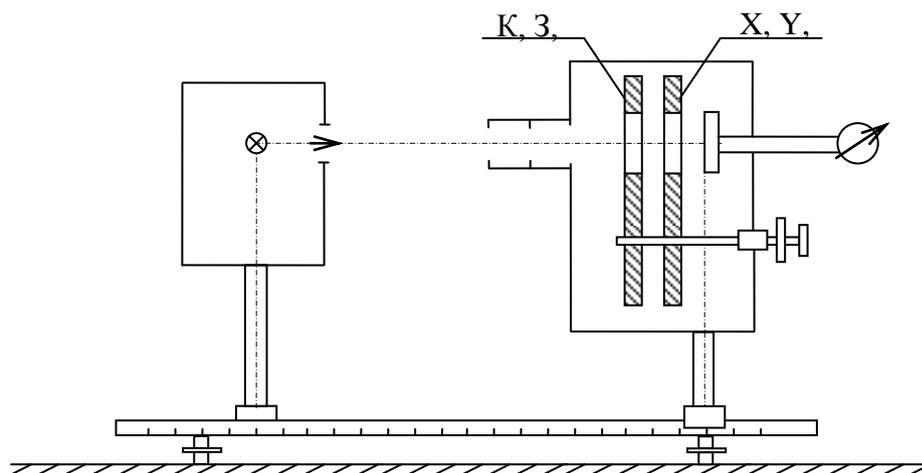


Рис. 8 Фотоэлектрический колориметр конструкции ВЭИ

В приемной головке колориметра расположен селеновый фотоэлемент, перед которым поочередно могут быть установлены исправляющие светофильтры, удовлетворяющие условию:

$$\begin{aligned} \tau_x(\lambda) &= a_x \frac{\bar{x}(\lambda)}{S(\lambda)}, \\ \tau_y(\lambda) &= a_y \frac{\bar{y}(\lambda)}{S(\lambda)}, \\ \tau_z(\lambda) &= a_z \frac{\bar{z}(\lambda)}{S(\lambda)}. \end{aligned} \tag{9}$$

Вместо стандартной функции сложения $\bar{x}(\lambda)$ используется новая функция $\bar{x}_n(\lambda)$, имеющая один максимум и связанная со стандартными функциями сложения линейным соотношением

$$\bar{x}_n(\lambda) = 0,833\bar{x}(\lambda) + 0,333\bar{y}(\lambda) - 0,167\bar{z}(\lambda) \quad (10)$$

Тогда координаты измеряемого цвета могут быть выражены через фототоки приемника при работе с тремя светофильтрами простыми линейными зависимостями

$$\begin{aligned} X &= C_x i_x - 0,4C_y i_y + 0,2C_z i_z, \\ Y &= C_y i_y, \\ Z &= C_z i_z, \end{aligned} \quad (11)$$

В приемной головке колориметра расположен селеновый фотоэлемент, перед которым поочередно могут быть установлены исправляющие светофильтры, удовлетворяющие условию (9). Светофильтры колориметра закреплены в диске, вращаемом большой рукояткой на головке прибора. Контроль располагаемого перед фотоэлементом светофильтра осуществляется через смотровое окно, в котором поочередно устанавливаются индексы 0, 1, X, Y, Z. При установке индекса 0 поверхность фотоэлемента перекрывается непрозрачной частью поворотного диска. В этом положении производится периодический контроль нулевого отсчета гальванометра с малым внутренним сопротивлением, измеряющего ток фотоэлемента. При установке индекса 1 поверхность фотоэлемента полностью открыта.

Малой поворотной рукояткой вращается второй диск с индексами 0, 1, К, 3, С. Расположенные в нем красный, синий и зеленый светофильтры используются при измерении цветовой температуры излучения (по сине-красному отношению) и для периодической проверки точности работы колориметра.

Колориметрическая головка и кожух осветителя располагаются на рельсе и могут передвигаться. Для исследования светофильтров на рельсе устанавливаются специальные держатели. Для измерения окрашенных

непрозрачных образцов вместо тубуса колориметрической головки надевается специальное сферическое зеркало. В центральной части этого зеркала имеется устройство для закрепления исследуемого образца и отверстие для прохода отраженных от образцов световых лучей к фотоэлементу.

При измерении цвета излучении путем поворота диска перед фотоэлементом вводятся последовательно светофильтры с индексами X, Y, Z и записываются соответствующие этим измерениям токи i_x , i_y , i_z . По полученным величинам трех фототоков, пользуясь градуировочными уравнениями (11), определяют координаты цвета излучения. Градуировочные коэффициенты для данного колориметра имеют следующие значения:

$$C_x=1,234; C_y=1; C_z=0,69$$

После подстановки значений этих постоянных получается следующий окончательный вид градуировочных уравнений:

$$\begin{aligned} X &= 1,234i_x - 0,4i_y + 0,138i_z, \\ Y &= i_y, \\ Z &= 0,69i_z. \end{aligned} \tag{12}$$

При измерении цвета излучении путем поворота диска перед фотоэлементом вводятся последовательно светофильтры с индексами X, Y, Z и записываются соответствующие этим измерениям токи i_x , i_y , i_z [8].

Как было сказано ранее, главным недостатком модернизируемого колориметра является использование селенового фотоэлемента в качестве приемника излучения. Установка с фотоэлектрическим колориметром конструкции ВЭИ с селеновым фотоэлементом является морально устаревшей.

В данной работе рассматривались возможные усовершенствования данного колориметра.

Во-первых, это замена фотоэлемента. Современные кремниевые фотодиоды обладают прекрасными метрологическими и эксплуатационными

характеристиками. Сравнение параметров Se и Si ФД удобно представить в виде таблицы [9]:

Таблица 1 Сравнительные характеристики фотоэлементов

Параметр	Se	Si
Спектральная характеристика	+	-
Быстродействие, с	$10^{-2} - 10^{-3}$	$10^{-7} - 10^{-9}$
Максимум спектральной характеристики	+	-
Площадь приемной поверхности, мм ²	около 1000	1 – 100
Стабильность	- -	++
Температурный коэффициент, $\frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$	≤ 1	≤ 0.1
Линейность	- -	++
Утомление	-	+
Фотодиодный режим	-	+

Спектральную характеристику селенового фотоэлемента проще исправлять под кривые $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{x}_{np}(\lambda)$. Из таблицы видно, что основные минусы селенового фотоэлемента связаны с его инерционностью, это является недостатком при измерении быстроменяющихся источников излучения. Низкая стабильность, более высокий коэффициент температурного расширения, утомляемость фотоэлемента при длительных измерениях - все это делает результаты измерения зависимыми от внешних условий. Наибольший недостаток, однако, заключен в значительно худшей линейности световых характеристик селенового фотоэлемента. При включении в цепь некоего нагрузочного сопротивления характер зависимости фотоэДС от освещенности селенового фотоэлемента сильно отличается от линейного, и это ограничивает его применение в измерительных целях.

Во-вторых, изменение метода воспроизведения кривой сложения: вместо того, чтобы вводить новую функцию $\bar{x}_n(\lambda)$, заменяющую кривую с двумя максимумами, проводится замена левой ветви кривой $\bar{x}(\lambda)$ некоторой величиной $k * \bar{z}(\lambda)$ [10], где k – масштабирующий коэффициент. Этот метод внесет свою погрешность, причем она будет разная при исследовании цветностей различных спектров. Правая ветвь кривой $\bar{x}(\lambda)$ воспроизводится путем коррекции спектральной чувствительности фотоприемника соответствующей комбинацией цветных стекол.

В-третьих, анализ замены специальных фильтров К, С для определения цветовой температуры источников света на корректирующие светофильтры, которые уже используются для спектрального согласования под соответствующие кривые сложения. Такая замена позволит значительно упростить конструкцию прибора и уменьшить затраты на его разработку и изготовление.

1.3. ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Для оценки цветности тепловых излучений часто используют цветовую температуру. Традиционное определение гласит, что цветовая температура – это температура черного тела, при которой цветность его излучения совпадает с цветностью исследуемого излучения при заданной (истинной) температуре. Очевидно, что сравниваются цветности изучаемого и известного излучений.

При определении цветовой температуры с помощью фотоэлектрического колориметра требуется другой подход к определению ЦТ. В этом случае речь идет о температуре спектрального отношения. Спектральные методы основаны на сравнении спектрального распределения излучения реального тела со спектральным распределением АЧТ. Для получения спектрального распределения необходимо обеспечить в пирометре возможность измерения потока в нескольких узких спектральных каналах (минимум в двух). Следовательно, выделяют бихроматическую (два канала) и полихроматическую (несколько каналов) пирометрию [16].

В методах бихроматической пирометрии спектральная плотность облученности измеряется на двух участках спектра. Цветовой температурой в этом случае называют температуру черного тела, при которой равны отношения СПЭЯ излучений черного и реального тел. При двух спектральных каналах, соответствующих длинам волн λ_1 и λ_2 , основой метода, который называется цветовым, является равенство:

$$\frac{L_{\lambda}(\lambda_2, T)}{L_{\lambda}(\lambda_1, T)} = \frac{L_{\lambda}^{AЧТ}(\lambda_2, T_{ц})}{L_{\lambda}^{AЧТ}(\lambda_1, T_{ц})} \quad (13)$$

Пирометры такого типа называются цветовыми или пирометрами спектрального отношения, а условная спектральная температура $T_{ц}$ – цветовой. В приближении Вина предыдущую формулу можно представить в виде:

$$\frac{\varepsilon_{\lambda}(\lambda_2, T) C_1 \lambda_2^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_2, T}\right)}{\varepsilon_{\lambda}(\lambda_1, T) C_1 \lambda_1^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1, T}\right)} = \frac{C_1 \lambda_2^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_2, T_u}\right)}{C_1 \lambda_1^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1, T_u}\right)} \quad (14)$$

Методическая погрешность измерения цветовой температуры оптическим пирометром определяется как разность $\Delta T_u = T - T_u$ действительной температуры тела и его цветовой температуры. Для анализа различных методов пирометрии удобно характеризовать методическую погрешность разностью обратных температур $\delta_u = \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T}$ [16]. В данном случае методическая погрешность измерения цветовой температуры примет вид:

$$\delta_u = \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T} = \frac{1}{C_2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln\left(\frac{\varepsilon_{\lambda}(\lambda_2, T)}{\varepsilon_{\lambda}(\lambda_1, T)}\right) \quad (14)$$

Анализ формул показывает, что метод требует оптимального выбора рабочих длин волн λ_1 и λ_2 . Их разнесение, с одной стороны, уменьшает отношение $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$, а значит, и методическую погрешность. С другой стороны, при этом различие в значениях $\varepsilon_{\lambda}(\lambda_1, T)$ и $\varepsilon_{\lambda}(\lambda_2, T)$ увеличивается, и по этой причине погрешность возрастает. Выбор длин волн производится с учетом критерия минимальной методической погрешности:

$\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln\left(\frac{\varepsilon_{\lambda}(\lambda_2, T)}{\varepsilon_{\lambda}(\lambda_1, T)}\right) = \min$ [16]. Тем не менее, в зависимости либо от характера спектрального распределения излучения, либо от поставленной задачи, могут быть выбраны две длины волны как в УФ, так и в ИК области.

В методах полихроматической пирометрии температура определяется по результатам измерений в трех и более спектральных каналах.

Использование такого метода целесообразно, если исследуемый спектр сильно отличается от спектра АЧТ. В данной работе этот метод не используется, поэтому подробно процесс расчета цветовой температуры не будет рассмотрен.

В некоторых случаях, например, при измерении температур поверхности звезд [17], удобно сравнивать спектральное распределение в определенной области, используя метод сравнения двух кривых. Параметром, на основе которого рассчитывается цветовая температура, является среднее квадратичное отклонение — квадратный корень из среднего арифметического квадратов разностей между значениями СПЭЯ сравниваемых спектров, измеренных с определенным шагом, и их средним арифметическим. *Цветовая температура*, полученная в результате расчетов, называется *температурой спектрального распределения*. Хотя этот метод точнее вышеупомянутых, в данной работе он также не используется главным образом из-за того, что работа посвящена другой тематике, а также из-за трудоемкости и сложности расчетов.

Нельзя не упомянуть также часто используемое понятие *коррелированной цветовой температуры*. Цветовая температура — температура черного тела, при которой координаты цветности его излучения близки, в пределах заданного допуска, к координатам цветности рассматриваемого излучения на цветовом графике, утвержденном Международной комиссией по освещению CIE в 1931 г. (рис. 9). Близость координат цветности определяется наименьшим геометрическим расстоянием между ними на диаграмме цветности МКО.

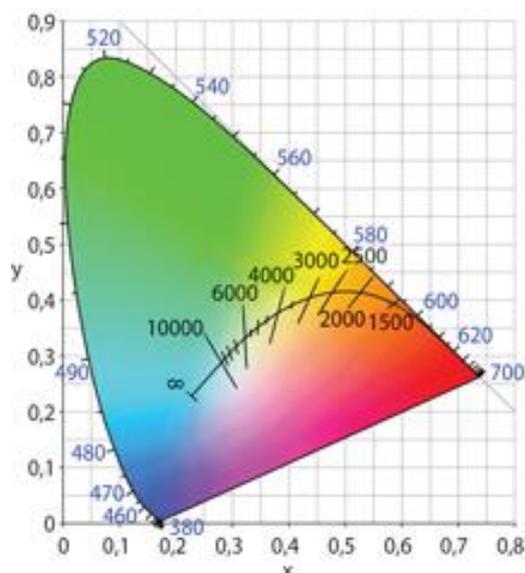


Рис.9 Диаграмма цветности МКО 1931 г.
с отложенной на ней кривой Планка

Если источник белого света не попадает на кривую Планка, отложенную на диаграмме, для его характеристики используется коррелированная цветовая температура (КЦТ). Эта величина также измеряется в Кельвинах и определяется температурой абсолютно черного тела, цветность которого максимально приближена к цветности источника белого света.

Расчетным и экспериментальным [15] образом было доказано, что о форме спектральной кривой, и, следовательно, о цветовой температуре источников света, подчиняющихся законам теплового излучения, можно с достаточной точностью судить по отношению спектральной плотности излучения в двух узких зонах, расположенных по краям видимого спектра. Для определения цветовой температуры этим методом в исходном фотоэлектрическом колориметре конструкции ВЭИ измеряют два тока на выходе фотоэлемента (при работе с синим и красным светофильтрами, «вырезающими» из излучения два узких спектральных участка). Значение цветовой температуры определяется по отношению этих токов с помощью кривой $T_c = f(i_c/i_k)$, построенной при предварительной градуировке.

На принципе измерения отношения двух монохроматических яркостей основано большинство технических цветных пирометров. Наиболее

перспективными из них следует признать те, в которых для измерения обеих монохроматических яркостей используется один и тот же приемник излучения с одним и тем же каналом усиления сигнала. В этом случае практически исключено влияние нестабильности во времени чувствительности фотоэлемента и коэффициента усиления электротехнической схемы [15]. Также, поскольку цветовая температура определяется не абсолютными значениями СПЭЯ, а их отношением, она не зависит от потерь в оптической среде пирометра и других элементах, *если* эти потери одинаковы в обоих измерительных каналах, либо если используется один канал [16].

В представленной работе исследовалась возможность измерения цветовой температуры излучения на основе «синей» и «красной» комбинаций стекол, используемых для коррекции под кривые сложения $\bar{z}(\lambda)$ и $\bar{x}_{np}(\lambda)$ соответственно. В расчете сравнивались две кривые $T_c=f(i_c/i_k)$, полученные обычным образом (с использованием специальных светофильтров, выделяющих узкие участки спектра) и новым способом (с использованием светофильтров для коррекции под $\bar{z}(\lambda)$ и $\bar{x}_{np}(\lambda)$). Сравняемым параметром была чувствительность системы, т.е. сравнивалась разница двух значений i_c/i_k при одной и той же разнице цветковых температур.

1.4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является модернизация установки фотоэлектрического колориметра, действующей в учебной лаборатории фотометрии в НИУ МЭИ. Модернизация включает в себя замену приемника излучения на кремниевый фотодиод и замену метода воспроизведения кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$. Следовательно, заменяются корректирующие светофильтры. Рассматривается возможность и рациональность изменения конструкции прибора – превращение одноканального колориметра в трехканальный с тремя приемниками излучения.

В работе предполагается выполнение следующих задач:

- Расчетная оценка погрешности, которую вносят старый и новый методы измерения (погрешность fI' по МКО). Определение наилучшего (приводящего к меньшей погрешности) масштабирующего коэффициента k для кривой $z(\lambda)$;
- Расчетная оценка погрешности, которую вносит новый метод измерения при работе с различными спектрами излучения (погрешность fI по МКО). Определение наилучшего масштабирующего коэффициента k , анализ результатов;
- Расчетная оценка погрешности коррекции, обусловленной использованием корректирующих светофильтров. При расчете светофильтров планируется использование базы отечественных цветных стекол по ГОСТ 9411-81, а также марок цветного стекла компании SCHOTT (Германия);
- Оценка методической и спектральной погрешностей в виде порогов цветоразличения по Мак-Адаму, выводы;
- Анализ способа измерения цветовой температуры излучения при помощи спектрального отношения с использованием новых комбинаций стекол, выводы;
- Предложения по конструкции нового колориметра.

2. ВЫБОР МЕТОДА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ КРИВЫХ СЛОЖЕНИЯ

2.1. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ

Во всех фотоэлектрических колориметрах для того, чтобы значение фототока было пропорционально какой-либо координате цвета, необходимо корректировать кривую спектральной чувствительности фотоэлемента под стандартные кривые сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Классический метод коррекции состоит в использовании последовательно расположенных стекол. Однако кривая $\bar{x}(\lambda)$ имеет 2 максимума, поэтому прямой подбор корректирующих светофильтров для коррекции под эту удельную координату цвета практически невозможен. Для решения проблемы было предложено несколько вариантов [10]:

- Схема Дреслера (рис. 10).

В этом случае варьируются не только марки и толщины стекол, но A_1 и A_2 – размеры фрагментов стекол относительно друг друга, см.рис.10. Такая схема согласования улучшает качество спектральной коррекции, но также усложняет калибровку, ведет к некоторому удорожанию прибора.

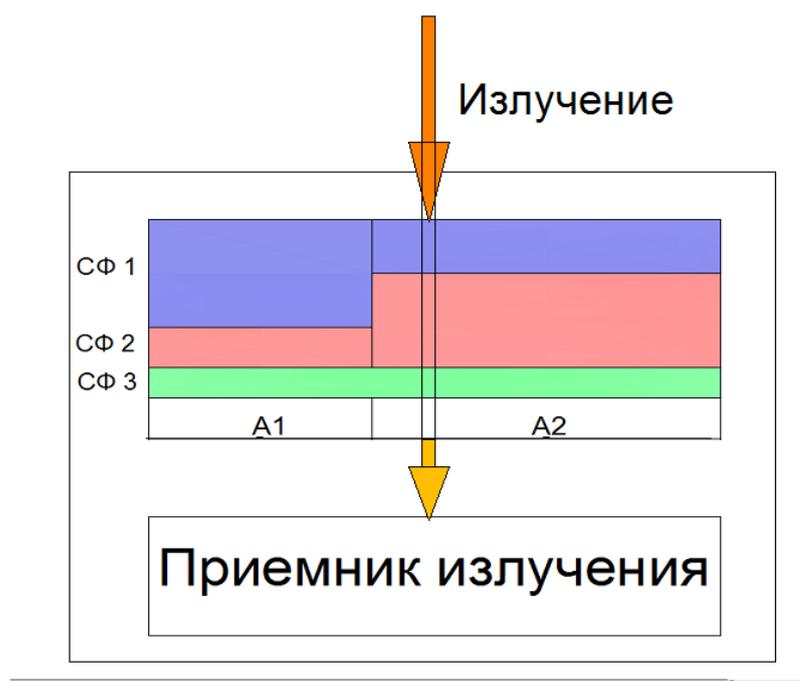


Рис.10 Схема Дреслера

- Использование парциальных светофильтров.

Такую технологию применяют в колориметрах компании LMT. Вместо последовательно расположенных светофильтров используется около 20 параллельно работающих стекол различной толщины. Как и в схеме Дреслера, варьируется тип стекла, толщина стекла d_{cm} , а также размеры фрагментов стекол относительно друг друга. Достигается высокая точность измерений, но значительно повышается цена.

- Метод замены кривой сложения [8,10].

Этот метод используется в модернизируемом колориметре конструкции ВЭИ. Вводят новую функцию $\bar{x}_n(\lambda)$, имеющую один максимум (рис. 11) в области 550-580 нм, что близко к максимуму спектральной чувствительности селенового фотозлемента (600 нм). Она связана со стандартными функциями сложения линейным соотношением

$$\bar{x}_n(\lambda) = 0,833\bar{x}(\lambda) + 0,333\bar{y}(\lambda) - 0,167\bar{z}(\lambda)$$

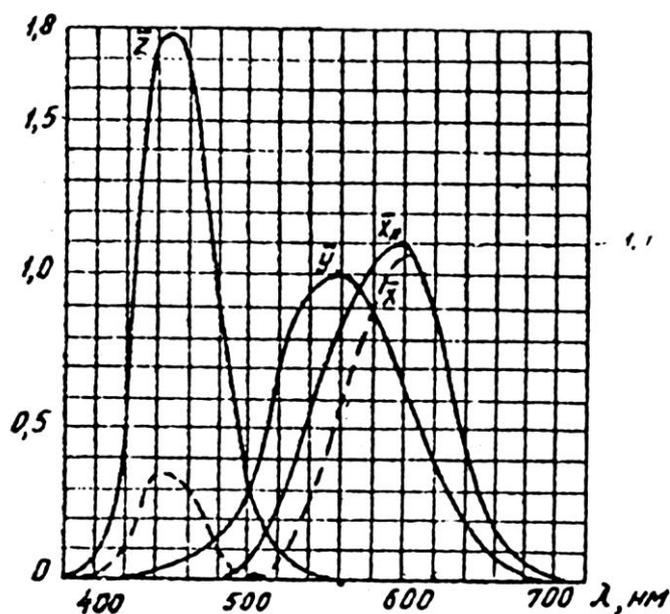


Рис. 11 Замена кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$ на $\bar{x}_n(\lambda)$

Этот метод не получил широкого распространения, в частности, из-за его непопулярности за рубежом. В данной работе причины этого не исследовались, поскольку требуется тщательный анализ недостатков метода, а его не было возможности проводить. Главным фактом является то, что

метод в настоящее время сильно устарел и не используется в схемах современных приборов.

- Четырехфильтровый колориметр.

Кривая $\bar{x}(\lambda)$ имеет два выраженных максимума, и можно заменить ее суммой двух функций с одним максимумом. Под левую и правую ветвь кривой $\bar{x}(\lambda)$ подбираются отдельные комбинации светофильтров. Погрешность коррекции значительно уменьшается, однако использование дополнительного набора светофильтров делает прибор дороже и больше, к тому же увеличивается число измерений, следовательно, уменьшается быстродействие.

- Замена $\bar{x}_r(\lambda)$ на $k * \bar{z}(\lambda)$

Идея воспроизведения кривой $\bar{x}(\lambda)$ состоит в следующем. Кривая $\bar{x}_r(\lambda)$ по форме похожа на кривую $\bar{z}(\lambda)$. Вместо использования отдельной комбинации стекол для коррекции под $\bar{x}_r(\lambda)$ выполняется коррекция только под $\bar{x}_{np}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Часть сигнала, которая должна идти от $\bar{x}_r(\lambda)$, заменяется на сигнал от кривой $\bar{z}(\lambda)$ и умножается на коэффициент k (масштабирующий коэффициент).

В данной работе рассматривался последний метод, поскольку он является одним из наиболее современных и позволяет производить небольшие, практичные колориметры для промышленных измерений; относительно невысокая себестоимость прибора также вызывает интерес у исследователей и инженеров. В [4] упомянуты исследования погрешности, возникающие из-за неточного соответствия левой части кривой $\bar{x}(\lambda)$ и кривой $\bar{z}(\lambda)$, проведенные Ван ден Аккером в 1937 году. Значение координаты цвета X было представлено им в следующем виде:

$$\begin{aligned} X &= X_{np} + aZ \\ X / Z &= X_{np} / Z + a \end{aligned} \tag{15}$$

где a – масштабирующий коэффициент. Предположим, что спектр исследуемого излучения укладывается по шкале длин волн до 504 нм (граница между двумя ветвями $\bar{x}(\lambda)$). Тогда, если рассматривать такое излучение, предыдущее выражение примет вид:

$$X/Z = a \quad (16)$$

Линии с постоянным значением X/Z образуют на графике цветности пучок прямых с центром в точке (Y) , рис.12. Этот пучок располагается в плоскости, перпендикулярной плоскости листа, поэтому на рисунке видна лишь одна линия.

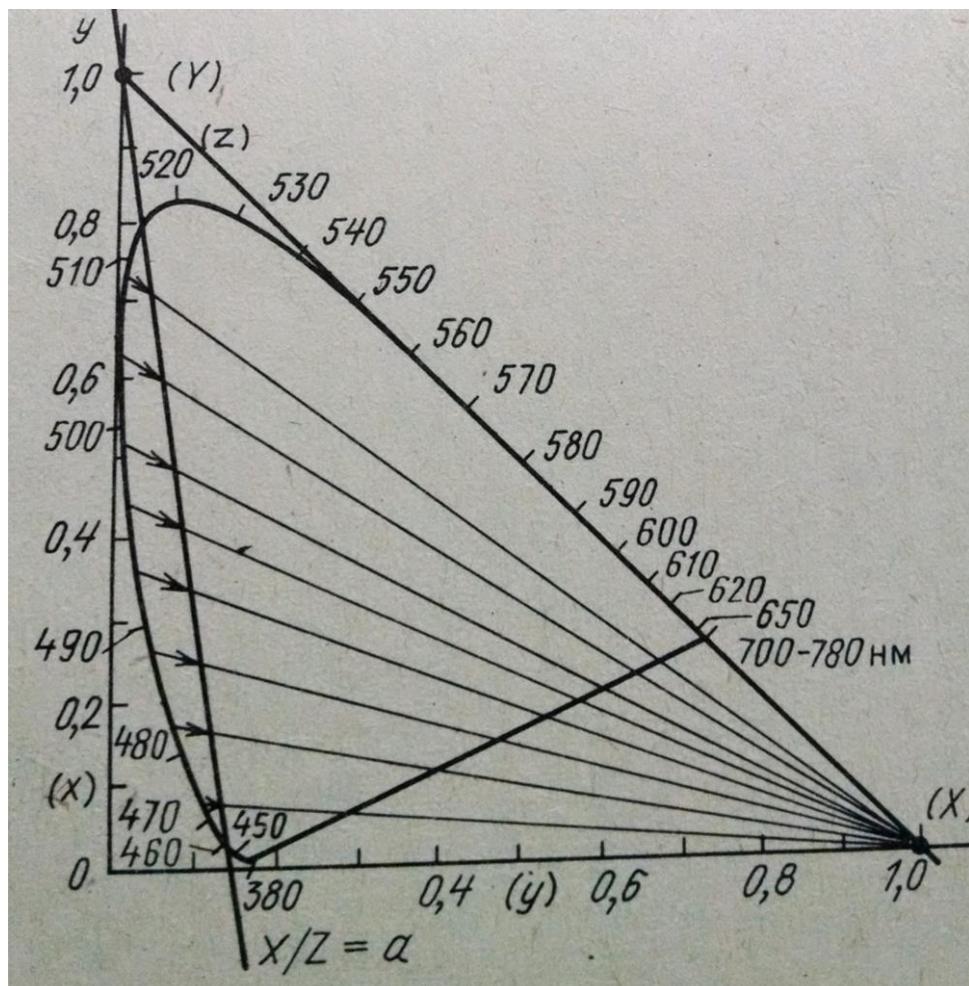


Рис.12 Погрешности измерения цветности из-за использования в колориметре кривой сложения $\bar{z}(\lambda)$ вместо $\bar{x}_l(\lambda)$

Таким образом, точки цветностей любых измеряемых цветов будут расположены между прямыми (z) и $x=az$. Левее кривой $x=az$ точки находиться не могут, т.к. отношение X/Z не может быть меньше a . Точки

истинных цветностей сдвигаются в точки ошибочных цветностей по прямым пучка $Y/Z=const$ с центром в точке (X) , поскольку координаты цвета Y и Z измеряются верно, и отношение этих координат для истинного и ошибочного цвета одно и то же. Величина сдвига будет зависеть от спектрального распределения излучения, соответствующего измеряемому цвету. Если правее 504 нм излучения нет, и точки истинных цветностей расположены левее кривой $X/Z = a$, точка сдвинется на эту прямую, если X_{np} больше 0, то за нее (рис.12) [4].

Между тем, в материале не приведены значения погрешностей для различных спектров излучения, не указано, будет ли такая погрешность приводить к видимому глазом изменению цветности излучения или цветных образцов. Наконец, не сравнивается величина этой погрешности с погрешностью спектрального согласования (из-за несовершенства корректирующих светофильтров).

Ниже приводится оценка методической погрешности и погрешности спектральной коррекции, обусловленной использованием корректирующих светофильтров. Результаты в виде цветовых смещений переведены в пространство пороговых эллипсов Мак-Адама, что помогает определить, вызывают ли эти смещения видимую глазом разницу в цветности.

2.2. ОЦЕНКА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ

Качество спектральной коррекции можно оценивать различными способами [9]. Наиболее употребимыми являются следующие критерии:

Критерий 1

Погрешность измерения обусловлена отклонением $S(\lambda)$ от $S_{cm}(\lambda)$ и различием спектрального распределения излучения источника типа А, используемого при градуировке, от исследуемого источника z со спектральным распределением излучения $\varphi_z(\lambda)$ [12].

Погрешность рассчитывается по следующим формулам:

$$f_{1z} = (1 - a_z) * 100\%$$
$$a_z = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_z(\lambda) * S(\lambda) d\lambda * \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_A(\lambda) * S_{cm}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_z(\lambda) * S_{cm}(\lambda) d\lambda * \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_A(\lambda) * S(\lambda) d\lambda} \quad (17)$$

$\varphi_z(\lambda)$ - спектральная плотность излучения исследуемого источника;

$\varphi_A(\lambda)$ - спектральная плотность излучения источника типа А;

$S_{cm}(\lambda)$ - спектральная чувствительность стандартного приемника излучения, под который выполняется коррекция. В данной работе роль таких функций играют удельные координаты цвета;

$S(\lambda)$ - спектральная чувствительность прибора (в данной работе – это произведение спектральной чувствительности используемого приемника излучения и спектрального коэффициента пропускания СФ).

Границы интегрирования λ_1 и λ_2 рекомендовано принимать от 0.38 до 0.78 мкм соответственно, хотя в некоторых источниках [12] границы приняты от 0 до ∞ .

Здесь и далее погрешность, рассчитываемая по формуле (17), будет называться методической погрешностью. Ее достоинством является высокая

объективность результата, соответствие реальной погрешности. Но большим недостатком является зависимость результата от исследуемого спектра. Для определения методической погрешности по формуле (17) рассчитывается ее значение для некоторого числа типовых спектров (в нашем случае - рекомендованные МКО + классические спектры белых люминофорных светодиодов, см.раздел 2.2.1), и за окончательную величину погрешности принимается максимальное из значений, полученных при таком расчете, т.е.

$$f_1 = \max |f_{1z}|$$

Критерий 2

Он основан на сравнении площади между нормированными исследуемой и стандартной кривой, и чем она меньше, тем лучше. По смыслу это скорее не погрешность, а показатель качества коррекции, близкий по порядку к реальным значениям погрешности. Его достоинство – независимость от измеряемых источников, т.е. универсальность. Здесь и далее погрешность, рассчитанная по этому критерию, будет называться показателем качества коррекции.

Определяется по формулам [12]:

$$f_1(\lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |c(\lambda) - S_{cm}(\lambda)| d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{cm}(\lambda) d\lambda} * 100\%$$

где

$$c(\lambda) = S(\lambda) * \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{cm}(\lambda) * \varphi_A(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) * \varphi_A(\lambda) d\lambda} \tag{18}$$

$c(\lambda)$ - нормированная исследуемая функция. Ее нормирование необходимо для того, чтобы площади исследуемой и стандартной кривыми совпадали [9].

Использование спектральной плотности потока стандартного источника типа А в качестве весовой функции накладывает определенные ограничения. В реальности колориметр может работать с источниками, спектральное распределение которых сильно отличается от кривой излучения черного тела (например, с ЛЛ).

Была проведена проверка, которая показала, что отсутствие этой функции при расчете $c(\lambda)$ не сильно повлияет на результат (с точностью до сотых). Поэтому будут использоваться формулы в виде:

$$f_1^{\wedge}(\lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |c(\lambda) - S_{cm}(\lambda)| d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{cm}(\lambda) d\lambda} * 100\%$$

где

$$c(\lambda) = S(\lambda) * \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{cm}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda} \tag{19}$$

Границы интегрирования λ_1 и λ_2 рекомендовано принимать от 0.38 до 0.78 мкм соответственно, хотя в некоторых источниках [11] границы также приняты от 0 до ∞ .

Выбор критерия зависит от поставленной цели. Для расчета методической погрешности используется критерий 1, а для простой оценки качества спектральной коррекции проще использовать критерий 2 (глава 3).

2.2.1. МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ F_1

При замене $\overline{x_n}(\lambda)$ на $k * \overline{z}(\lambda)$ необходимо выбрать значение коэффициента k , при котором погрешность будет минимальна.

Для начала поиск минимального значения коэффициента проводился при расчете показателя качества коррекции f_1^{\wedge} (ф.(19), критерий 2). Это может позволить оценить примерную величину погрешности, т.к. обычно f_1^{\wedge} и f_1 не сильно отличаются [9], и знание порядка методической погрешности

позволит принять решение о целесообразности метода замены $\bar{x}_n(\lambda)$ на $k * \bar{z}(\lambda)$ вообще. (Например, в [19] была произведена оценка показателя качества коррекции в случае, если заменяем не $\bar{x}_n(\lambda)$ на $k * \bar{z}(\lambda)$, а $\bar{z}(\lambda)$ на $k * \bar{x}_n(\lambda)$. Такая замена приводит к погрешности, недопустимой даже для учебных измерений (около 30%). Следовательно, дальнейшие расчеты в этом направлении были нецелесообразны).

Расчеты велись в программе MatLab. Диапазон изменения коэффициента k был принят от 0.02 до 1,02 с шагом 0,01. Наилучший показатель качества коррекции будет достигаться при $k = 0.173$.

Она будет равна:

$$f_1(\lambda) = \frac{\int_{0.38}^{0.78} \left| \bar{x}_{1n}(\lambda) - (\bar{x}_n(\lambda) + \bar{x}_{np}(\lambda)) \right| d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} (\bar{x}_n(\lambda) + \bar{x}_{np}(\lambda)) d\lambda} * 100\% = 3,76\%,$$

где

$$\bar{x}_{1n}(\lambda) = (\bar{z}(\lambda) * 0.173 + \bar{x}_{np}(\lambda)) * \frac{\int_{0.38}^{0.78} (\bar{x}_n(\lambda) + \bar{x}_{np}(\lambda)) d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} (\bar{z}(\lambda) * 0.173 + \bar{x}_{np}(\lambda)) d\lambda} \quad (20)$$

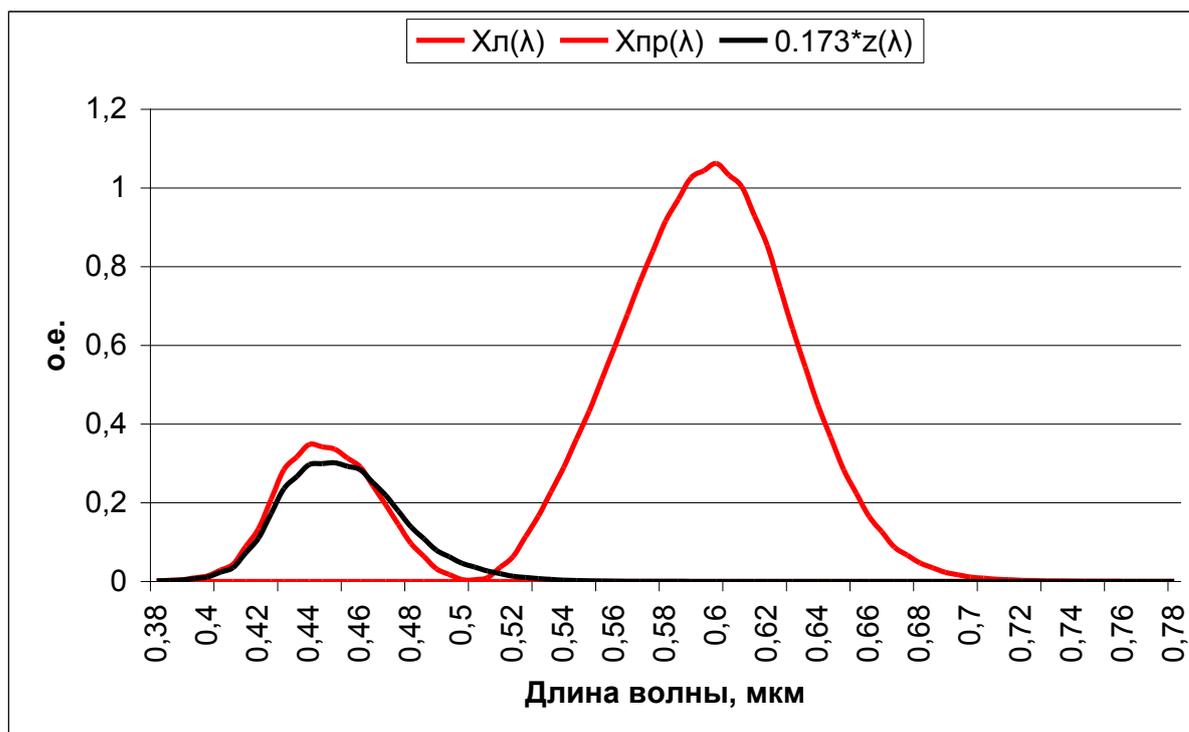


Рис.13 Кривая $\bar{x}(\lambda)$ и модифицированная $\bar{z}(\lambda)$

3.76% - значение показателя качества коррекции при использовании рассматриваемого метода воспроизведения кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$. Хотя это и формальный параметр, на данном этапе видно, что последующий расчет методической погрешности вполне оправдан.

Итак, для оценки возникающей методической погрешности будет использован критерий 1. Тогда значение коэффициента k будет определяться по формуле (17), где $\varphi_z(\lambda)$ - спектр исследуемого излучения. Для каждого типа спектра, теоретически, будет существовать свой оптимальный коэффициент k , при котором погрешность f_i будет минимальна. Расчет проводился для следующих спектров: спектры, рекомендованные МКО для оценки спектральной погрешности – Ф1 (ЛЛ с трехполостным люминофором), Ф2 (РЛВД), Ф3 (НЛВД), Ф4 (МГЛ), Ф5 (МГЛ с РЗМ добавками); спектры типичных люминесцентных ламп с разными люминофорами и различной ЦТ F1-F12 [18]; спектры типа D, имитирующие дневное освещение с различной цветовой температурой; спектры

люминофорных светодиодов компании Cree семейства XR-C 7090 с различными ЦТ. В ходе работы некоторые спектры были исключены, поскольку были очень похожи на какие-то другие спектры – например, спектр F3 отличался от спектра F4 настолько мало, что F3 из расчетов был исключен.

Таблица 2. Результат поиска оптимального коэффициента k при помощи критерия 1

Спектр	Значение погрешности, %	Значение коэффициента k	$T_{цв}$
Ф1	0,0688	0,151	2500
Ф2	0,7842	0,022	3100
Ф3	0,098	0,154	2200
ФА	0	-	2800
F4	0,003	0,581	2900
SD3	0,0091	0,412	3000
F12	0,0009	0,411	3000
Ф5	0,1345	0,172	5200
F1	0,3723	0,182	6500
F7	0,3575	0,177	6600
F2	0,0364	0,190	4300
F8	0,0153	0,172	5000
F10	0,2143	0,181	5000
D50	0,2166	0,169	5000
D55	0,2914	0,172	5600
D65	0,2078	0,171	6700
D75	0,1203	0,173	7700
SD1	0,2884	0,201	5000
SD2	0,0082	0,203	4000

Из таблицы 2 видно, что, если для поиска оптимального коэффициента k применить критерий 1, то методическая погрешность во всех случаях будет меньше 1%. При этом оптимальный коэффициент k в большинстве случаев

близок к 0,173. Поэтому погрешность была рассчитана еще раз, но уже с использованием конкретного коэффициента $k=0.173$, по формуле:

$$f1_z = (1 - a_z) * 100\%$$

$$a_z = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_z(\lambda) * (0.173 * \bar{z}(\lambda) + \bar{x}_{np}(\lambda)) d\lambda * \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_A(\lambda) * (\bar{x}_r(\lambda) + \bar{x}_{np}(\lambda)) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_z(\lambda) * (\bar{x}_r(\lambda) + \bar{x}_{np}(\lambda)) d\lambda * \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_A(\lambda) * (0.173 * \bar{z}(\lambda) + \bar{x}_{np}(\lambda)) d\lambda} \quad (21)$$

Результаты расчета приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результат расчета методической погрешности с помощью критерия 1 при $k=0.173$

Спектр	Значение погрешности, %	Значение коэффициента k	T _{цв}
Ф1	0,3521	0,173	2500
Ф2	1,1166	0,173	3100
Ф3	0,5201	0,173	2200
ФА	0,0000	0,173	2800
F4	1,0178	0,173	2900
SD3	0,6084	0,173	3000
F12	0,7514	0,173	3000
Ф5	0,1345	0,173	5200
F1	0,4227	0,173	6500
F7	0,3575	0,173	6600
F2	0,7422	0,173	4300
F8	0,0153	0,173	5000
F10	0,7410	0,173	5000
D50	0,3233	0,173	5000
D55	0,2914	0,173	5600
D65	0,2078	0,173	6700
D75	0,1203	0,173	7700
SD1	3,2195	0,173	5000
SD2	0,9923	0,173	4000

Методическая погрешность для большинства спектров составляет менее 1%, однако некоторые значения превышают этот предел: для спектра Ф2 погрешность равна 1,117%, для спектра F4 - 1,018%, а для спектра светодиода Cree XR-C 7090 с ЦТ 5000К она составляет 3,22%. Эти спектры объединены наличием существенной доли излучения в области, где несовпадения кривых $\bar{x}_n(\lambda)$ и $k * \bar{z}(\lambda)$ имеют наибольшую значимость, т.е. в областях 0,42-0,45 мкм или 0.46-0.52 мкм.

Следовательно, для оценки методической погрешности далее будет использовано максимальное значение методической погрешности (рассчитанное для коэффициента $k=0.173$), равное 3,22%.

3. ПОГРЕШНОСТЬ КОРРЕКЦИИ ПОД УДЕЛЬНЫЕ КООРДИНАТЫ ЦВЕТА

Чтобы фототок на выходе колориметре был пропорционален координате цвета, чувствительность фотоэлемента должна быть пропорциональна соответствующей кривой сложения. Однако все реальные фотодиоды имеют иные кривые спектральной чувствительности (рис.14, в качестве приемника – кремниевый фотодиод производства компании Hamamatsu S1087):

▣ **Electrical and optical characteristics (Typ. Ta=25 °C, unless otherwise noted)**

Type no.	Spectral response range λ (nm)	Peak sensitivity wavelength λ_p (nm)	Photosensitivity S (A/W)		Infrared sensitivity ratio (%)	Short circuit current I_{sc} 100 lx (μ A)	Temp. coefficient of I_{sc} (%/°C)	Dark current I_D VR=1 V max. (pA)	Temp. coefficient of TCD (times/°C)	Rise time t_r VR=0 V RL=1 k Ω (μ s)	Terminal capacitance C_t VR=0 V f=10 kHz (pF)	Shunt resistance Rsh VR=10 mV		
			λ_p	GaP LED 560 nm								He-Ne laser 633 nm	Min. (G Ω)	Typ. (G Ω)
S1087	320 to 730	560	0.3	0.3	0.19	10	0.16	-0.01	10	1.12	0.5	200	10	250
S1087-01	320 to 1100	960	0.58	0.33	0.38	-	1.3	0.1						
S1133	320 to 730	560	0.3	0.3	0.19	10	0.61	-0.01	20	1.12	2.5	700	10	100
S1133-01	320 to 1100	960	0.58	0.33	0.38	-	5.4	0.1						
S1133-14	320 to 1000	720	0.4	0.33	0.37	-	3.1	-			0.5	200		50

▣ **Spectral response**

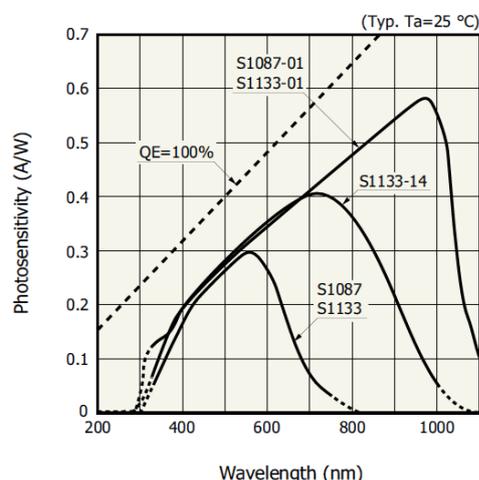


Рис.14 Данные приемника Hamamatsu S1087 [25]

Такой приемник выбран потому, что он охватывает видимый диапазон длин волн, при этом имеет минимальную чувствительность за его пределами. Максимальная чувствительность приемника достигается при 560 нм, а это облегчает подбор стекол для КСФ под $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{x}_{np}(\lambda)$. Приемник также

характеризуется высоким быстродействием (0,5 мкс), малым значением темнового тока (1 пА).

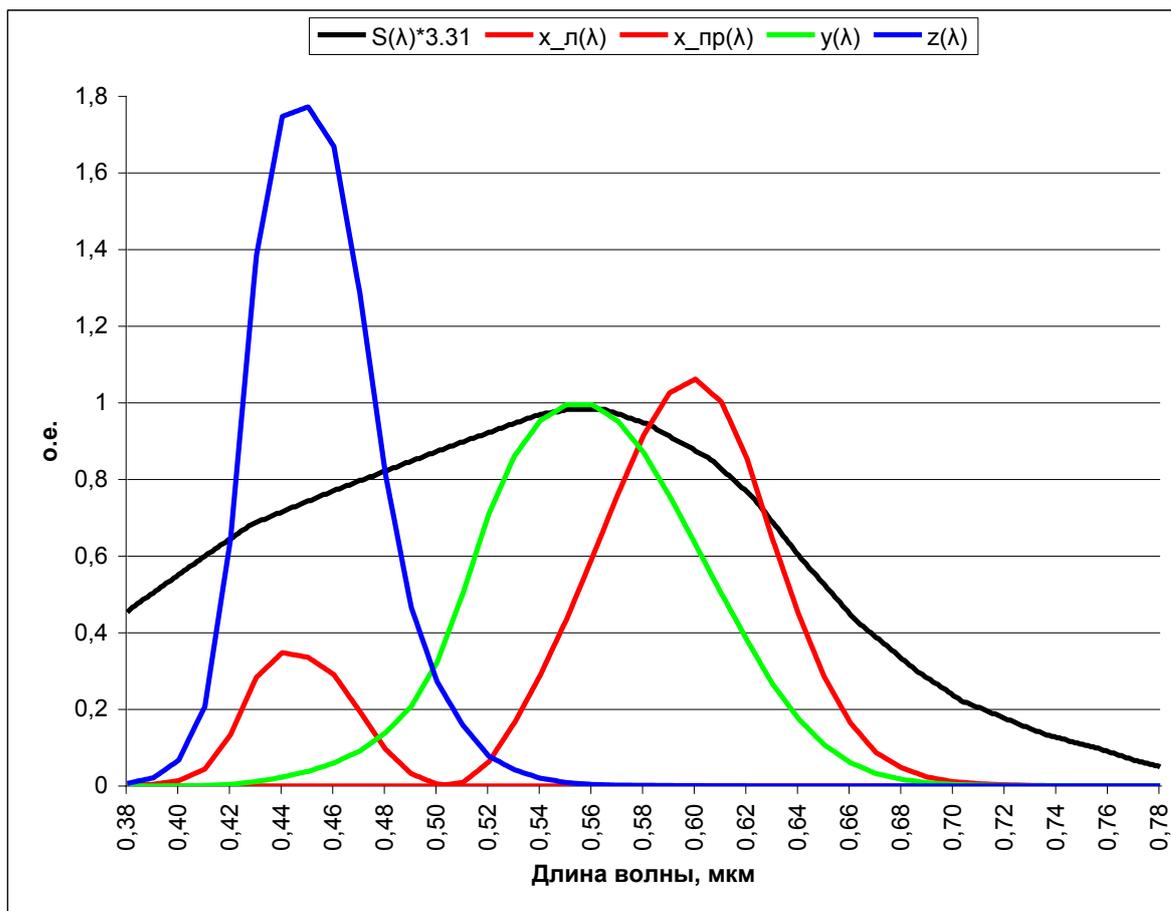


Рис. 15 Чувствительность кремниевого фотодиода и кривые сложения МКО
1931 г.

На рис.15 и далее спектральная чувствительность фотодиода умножена на коэффициент 3,31 для приведения ее максимума к единице. Сделано это только с целью облегчения визуального восприятия графиков, в расчетах коэффициент не участвует.

Для достижения поставленной задачи необходима коррекция кривой $S(\lambda)$ фотодиода. Для этого используются светофильтры – наборы цветных оптических стекол, характеризующихся полосами или областями избирательного поглощения.

Будет рассмотрено только последовательное расположение стекол, поскольку это является наиболее доступным методом коррекции, к тому же использование парциального светофильтра (см. главу 2.1.) для учебных работ

не оправдано. Для коррекции под каждую кривую сложения будет использовано по три стекла, расположенных друг за другом, не склеенных. В расчетах использованы марки стекол по ГОСТ 9411-81, а также производства компании Schott (Германия).

В ГОСТ 9411-81 для каждой марки стекла указан показатель поглощения стекла на 1 мм оптического пути - $\alpha(\lambda)$. Оптическая плотность слоя стекла $D(\lambda)$ связана с показателем поглощения $\alpha(\lambda)$ и показателем пропускания $\tau(\lambda)$ следующей формулой [10]:

$$D(\lambda) = -\lg \tau(\lambda) = \alpha(\lambda) * d_{cm} \quad (22)$$

Из формулы (22) нельзя напрямую получить коэффициент пропускания стекла данной марки и толщины, так как при расчете оптической плотности потери на френелевские отражения не учитываются. Спектральный коэффициент пропускания стекла рассчитывается по закону Бугера-Ламберта [10]:

$$\tau(\lambda) = (1 - \rho)^2 * 10^{-\alpha(\lambda) * d_{cm}} \quad (23)$$

$\tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания стекла;

$$\rho = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

- коэффициент отражения стекла при нормальном падении света;

n – показатель преломления стекла;

$(1 - \rho)^2$ – коэффициент, показывающий часть потока, прошедшую в цветное стекло при отсутствии поглощения (у стекла две грани преломления, каждая пропускает $(1 - \rho)$ части светового потока);

$\alpha(\lambda)$ – показатель поглощения стекла для 1 мм оптического пути;

d_{cm} – длина оптического пути (при нормальном падении света она принимается равной толщине рассматриваемого стекла).

Компания Schott использует другую систему обозначения спектрального пропускания стекол [20]. Для каждой марки стекла указан спектральный коэффициент пропускания $\tau(\lambda)$ для определенной толщины стекла. Также используется показатель потерь на отражение (reflection loss):

$$P(\lambda) = \frac{2 * n(\lambda)}{n(\lambda)^2 + 1} \quad (24)$$

Коэффициент пропускания для стекла толщины d_2 определяется, согласно справочной информации в каталоге, по формуле:

$$\tau(\lambda, d_2) = 10^{\frac{d_2 * \log \tau(\lambda, d_1) + d_1 * \log P(\lambda)}{d_1}} \quad (25)$$

где d_2 - необходимая толщина стекла, d_1 – номинальная толщина стекла для данной марки, $n(\lambda)$ - коэффициент преломления стекла, обычно имеет слабую зависимость от длины волны и принимается постоянным.

В [19] был показан вариант подбора светофильтров для трех разных приемников излучения. Хотя такой подход может быть оправдан с точки зрения лучшей спектральной коррекции, это накладывает ряд ограничений как на конструкцию прибора (возможен только вариант с тремя каналами излучения), так и на особенности измерения. Приемники имеют различное быстродействие (от 0,025 мкс у фотодиода S8664-55 до 100 мкс у ФД-288); разную площадь приемной поверхности (от 0,58 мм² у фотодиода G5645 до 100 мм² у ФД-288). Более того, это ведет к удорожанию прибора.

В данной работе будет рассмотрен вариант использования одного приемника излучения – кремниевого фотодиода Hamamatsu S1087, а потом приведено сравнение погрешностей спектральной коррекции для этого приемника и для приемников, рассмотренных в [19].

3.1. РАСЧЕТ \bar{y} – СВЕТОФИЛЬТРА

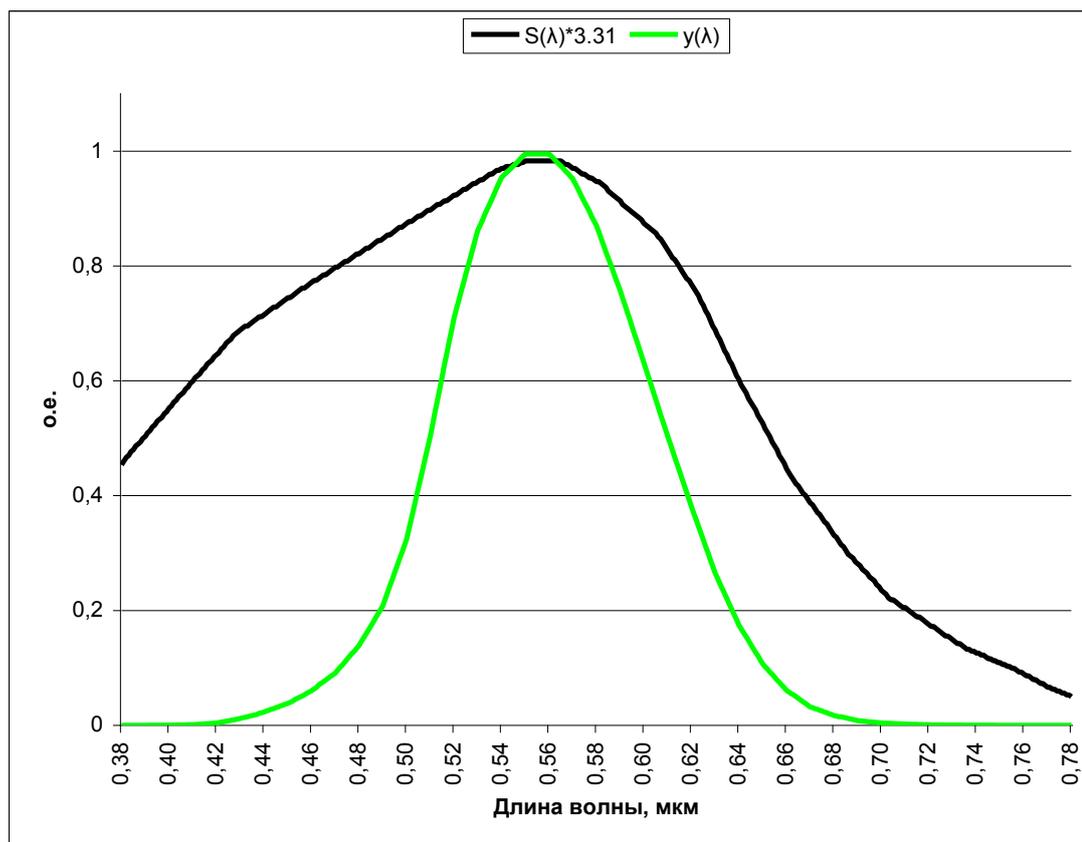


Рис. 16 Кривая сложения $\bar{y}(\lambda)$ и кривая чувствительности кремниевого фотодиода

Экспериментально были выбраны марки стекол: СЗС-23, ЗС-8, ЖЗС-18, рис.17. По вертикальной оси отложены значения коэффициентов пропускания стекол на каждой длине волны. Толщина каждого стекла – 3 мм [11].

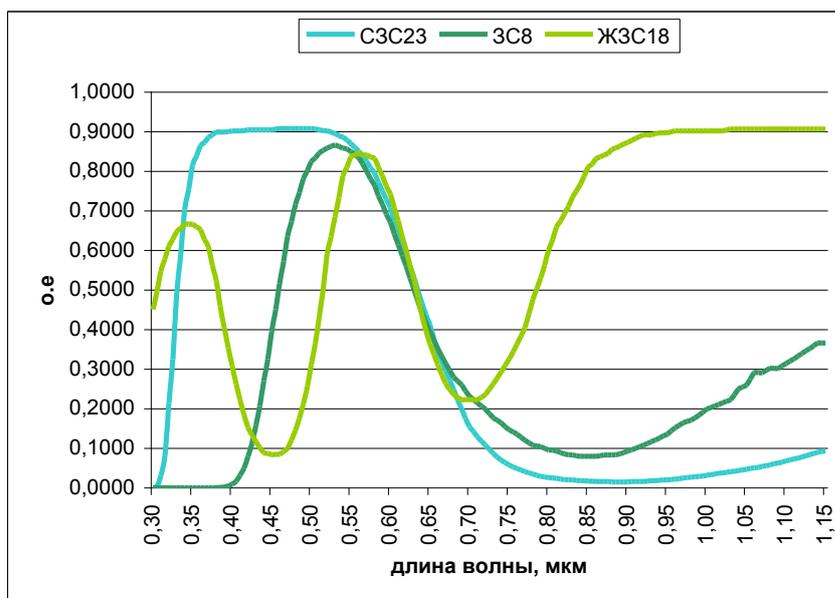


Рис.17 Кривые пропускания цветных стекол (толщиной 3 мм) для коррекции

под $\bar{y}(\lambda)$

Функция скорректированной спектральной чувствительности приемника будет иметь вид:

$$y_1(\lambda) = \tau_{1y}(\lambda) * \tau_{2y}(\lambda) * \tau_{3y}(\lambda) * S_{Si}(\lambda) \quad (26)$$

Для определения минимальной погрешности коррекции будет использована формула для расчета f_1' (19):

$$c(\lambda) = y_1(\lambda) * \frac{\int_{0.38}^{0.78} \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} y_1(\lambda) d\lambda}$$

$$f_1'(\lambda) = \frac{\int_{0.38}^{0.78} |c(\lambda) - \bar{y}(\lambda)| d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} \bar{y}(\lambda) d\lambda} * 100\% \quad (27)$$

Формула выбрана из тех же соображений, что и при начальном этапе расчета методической погрешности – необходимо значение примерной погрешности, которое будет являться показателем качества произведенной коррекции, и будет общим для всех источников излучения. Оно позволит

подобрать общую для всех спектров излучения комбинацию СФ. Погрешности f_l , возникающие при использовании рассчитанных корректирующих светофильтров, приведены в главе 4.

В публикациях МКО рекомендовано производить операции интегрирования в пределах видимого диапазона (0.38-0.78 мкм), хотя границы интегрирования также могут быть выбраны в области чувствительности фотодиода. В данной работе спектральная чувствительность фотодиода ограничивается видимым диапазоном длин волн, поэтому границы интегрирования приняты от 0,38 до 0,78 мкм.

Для уменьшения погрешности спектральной коррекции произведен подбор параметров стекол. Марки выбраны, соответственно, надо выбрать толщины фильтров, соответствующие минимальной погрешности. Автоматический перебор толщин стекол производится в программе Matlab с шагом 1 мкм в пределах:

$$q = 1.5, 1.501 \dots 1.8 \text{ мм}$$

$$m = 1.4, 1.501 \dots 1.7 \text{ мм}$$

$$p = 1.8, 1.801 \dots 2.1 \text{ мм}$$

$$\tau_{1y}(\lambda, q) = (1 - \rho_{1y})^2 * 10^{-сзс23(\lambda)*q}$$

$$\tau_{2y}(\lambda, m) = (1 - \rho_{2y})^2 * 10^{-зс8(\lambda)*m}$$

$$\tau_{3y}(\lambda, p) = (1 - \rho_{3y})^2 * 10^{-жзс18(\lambda)*p}$$

(28)

Минимальная погрешность достигается при $q = 1.604$ мм, $m = 1.505$ мм, $p = 2.001$ мм, и погрешность спектральной коррекции равна:

$$f_1(\lambda) = \frac{\int_{0.38}^{0.78} |c(\lambda) - \bar{y}(\lambda)| d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} \bar{y}(\lambda) d\lambda} * 100\% = 2,29\%$$

zde

$$c(\lambda) = y_1(\lambda) * \frac{\int_{0.38}^{0.78} \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} y_1(\lambda) d\lambda}$$

(29)

3.2. РАСЧЕТ Z – СВЕТОФИЛЬТРА

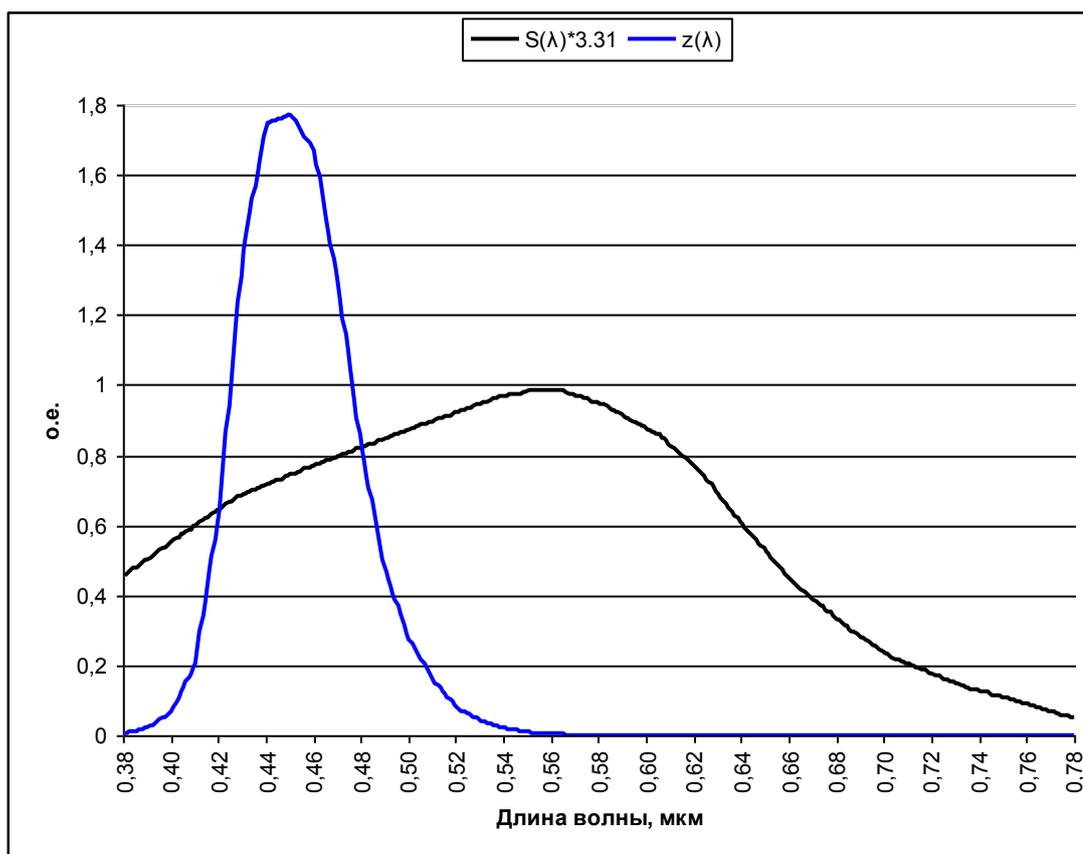


Рис. 18 Кривая сложения $\bar{z}(\lambda)$ и кривая чувствительности Si фотодиода

Экспериментально выбраны марки стекол: СС-8, ЖС-10, СЗС-20 рис. 19. По вертикальной оси отложены значения коэффициентов пропускания стекол на каждой длине волны. Толщина каждого стекла – 3 мм [11].

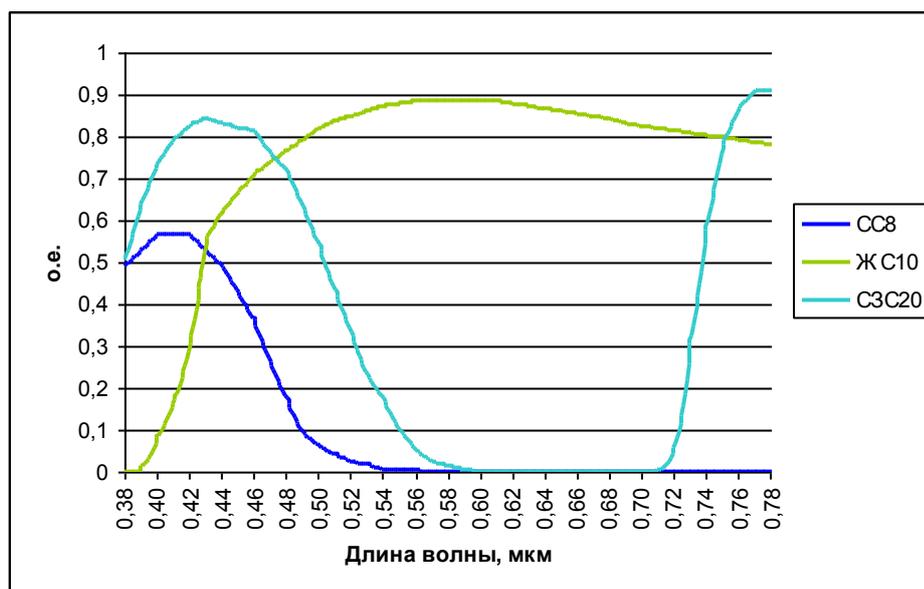


Рис.19 Кривые пропускания цветных стекол (толщина стекол – 3 мм) для коррекции под $\bar{z}(\lambda)$ с использованием кремниевого фотодиода

Перебор толщин проводится с шагом 1 мкм в следующих диапазонах

$$q = 3.3, 3.601 \dots 3.6 \text{ мм}$$

$$m = 3.4, 3.401 \dots 3.7 \text{ мм}$$

$$p = 1.3, 1.301 \dots 1.6 \text{ мм}$$

$$\tau_{1z}(\lambda, q) = (1 - \rho_{1z})^2 * 10^{-cc8(\lambda)*q}$$

$$\tau_{2z}(\lambda, m) = (1 - \rho_{2z})^2 * 10^{-жс10(\lambda)*m} \quad (30)$$

$$\tau_{3z}(\lambda, p) = (1 - \rho_{3z})^2 * 10^{-сзс20(\lambda)*p}$$

$$z_1(\lambda) = \tau_{1z}(\lambda) * \tau_{2z}(\lambda) * \tau_{3z}(\lambda) * S_{Si}(\lambda)$$

Минимальная погрешность достигается при $q = 3.544$ мм, $m = 3.563$ мм, $p = 1,500$ мм. Показатель качества спектральной коррекции при этом равен:

$$f_1(\lambda) = \frac{\int_{0.38}^{0.78} |c(\lambda) - \bar{z}(\lambda)| d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} \bar{z}(\lambda) d\lambda} * 100\% = 3,05\%$$

где

$$c(\lambda) = z_1(\lambda) * \frac{\int_{0.38}^{0.78} \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} z_1(\lambda) d\lambda} \quad (31)$$

3.3. РАСЧЕТ $X_{пр}$ - СВЕТОФИЛЬТРА

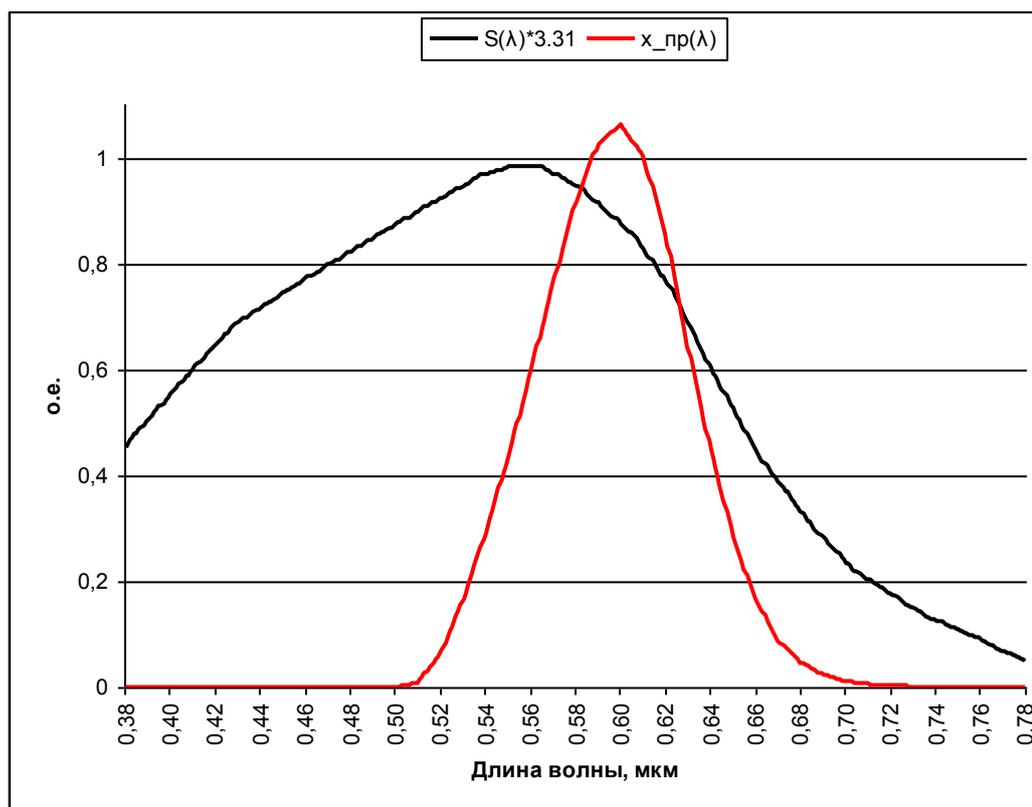


Рис.20 Кривая сложения $\overline{x_{пр}}(\lambda)$ и кривая чувствительности Si фотодиода

Выбраны стекла OG-530 (Schott), OC-5 и C3C21 (рис.21). По вертикальной оси отложены значения коэффициентов пропускания стекол на каждой длине волны. Толщина каждого стекла – 3 мм [11].

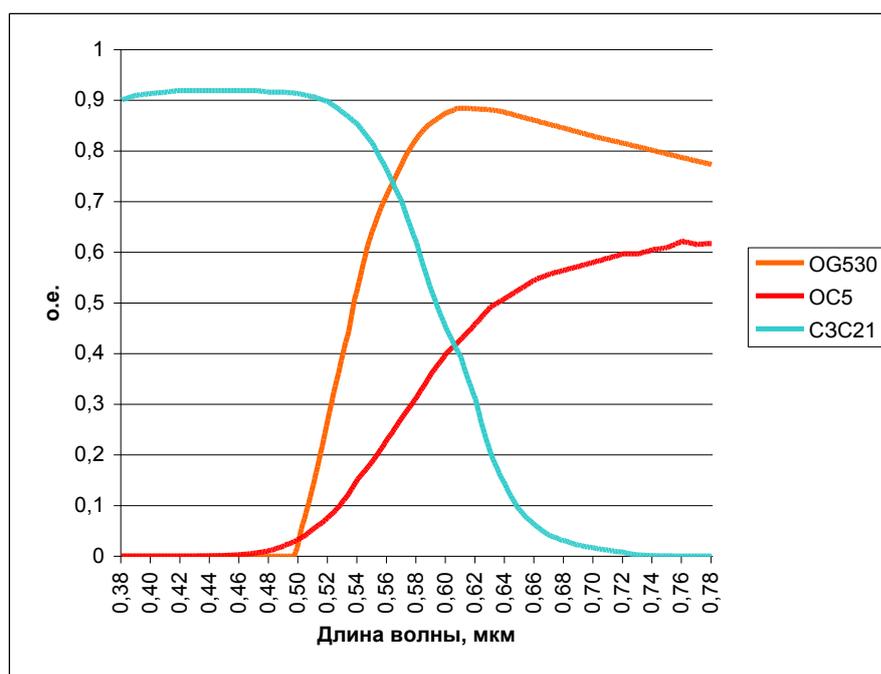


Рис.21 Коэффициенты пропускания стекол (толщина стекол – 3 мм) для коррекции под $\overline{x_{np}}(\lambda)$

Перебор толщин проводится с шагом 1 мкм в следующих диапазонах

$$q = 1.7, 1.701 \dots 2.0 \text{ мм}$$

$$m = 4.4, 4.401 \dots 4.7 \text{ мм}$$

$$p = 1.3, 1.301 \dots 1.6 \text{ мм}$$

$$\tau_{1x}(\lambda, q) = 10^{\frac{q * \log OG530(\lambda, 3) + 3 * \log P(\lambda)}{3}}$$

$$\tau_{2x}(\lambda, m) = (1 - \rho_{2x})^2 * 10^{-oc5(\lambda) * m}$$

$$\tau_{3x}(\lambda, p) = (1 - \rho_{3x})^2 * 10^{-c3c21(\lambda) * p}$$

$$x_2(\lambda) = \tau_{1x}(\lambda) * \tau_{2x}(\lambda) * \tau_{3x}(\lambda) * S_{Si}(\lambda)$$
(32)

Минимальная погрешность достигается при $q = 1.902$ мм, $m = 4.503$ мм, $p = 1,484$ мм. Показатель качества спектральной коррекции при этом равен:

$$f_1(\lambda) = \frac{\int_{0.38}^{0.78} |c(\lambda) - \overline{x_{np}}(\lambda)| d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} \overline{x_{np}}(\lambda) d\lambda} * 100\% = 3,36\%$$

где

$$c(\lambda) = x_2(\lambda) * \frac{\int_{0.38}^{0.78} \overline{x_{np}}(\lambda) d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} x_2(\lambda) d\lambda}$$
(33)

3.4. СРАВНЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

После расчета светофильтров для фотодиода S1087 под кривые сложения нужно привести таблицу, в которой сравниваются используемые светофильтры и приемники излучения для варианта с одним приемником и с тремя приемниками излучения (из [19]). Сравниваются не только абсолютные значения показателей качества спектральной коррекции, но и толщины стекол (с точки зрения возможности заводского изготовления).

Таблица 4. Сравнение результатов спектральной коррекции

		Вариант 1			Вариант 2		
<u>Y-канал</u>							
Фотодиод	Обозначение	S1087			ФД-288		
Стекла	Обозначение	СЗС-21	ЗС-8	ЖЗС-18	СЗС-23	ЗС-8	ЖЗС-18
	Толщина, мм	1,604	1,505	2,001	1,57	1,655	2,35
	Общая толщина светофильтра, мм	5,11			5,575		
f_l'	%	<u>2,29</u>			<u>3,34</u>		
<u>Z-канал</u>							
Фотодиод	Обозначение	S1087			G5645		
Стекла	Обозначение	СС-8	ЖС-10	СЗС-20	СЗС-8	СС-8	ЖЗС-10
	Толщина, мм	3,544	3,563	1,5	0,7	3,47	4,445
	Общая толщина светофильтра, мм	8,607			8,615		
f_l'	%	<u>3,05</u>			<u>3,74</u>		
<u>Xпр-канал</u>							
Фотодиод	Обозначение	S1087			S8664-55		
Стекла	Обозначение	OG-530	OC-5	СЗС-21	OC-5	OC-11	СЗС-21
	Толщина, мм	1,902	4,503	1,484	0,2	1,57	5,275
	Общая толщина светофильтра, мм	7,889			7,045		
f_l'	%	<u>3,36</u>			<u>3,49</u>		

Вариант 1 – это версия расчета, когда для коррекции под каждую из кривых сложения использовался один типа приемника излучения (Hamamatsu S1087). Вариант 2 – версия, когда для коррекции под каждую из кривых сложения использовались разные типы приемников излучения (ФД288 для коррекции под $\bar{y}(\lambda)$, G5645 для коррекции под $\bar{z}(\lambda)$, S8664-55 для коррекции под $\bar{x}_{np}(\lambda)$). Вариант 2 был подробно рассмотрен в [19], а в данной работе в таблице 4 представлены лишь результаты спектрального согласования.

Из таблицы видно, что Вариант 1 (с использованием одного типа фотоприемника) по всем параметрам удачнее Варианта 2 (с тремя разными типами приемников). Показатель качества спектральной коррекции для всех каналов лучше (особенно это заметно для Y- и Z-каналов). Более того, в Варианте 2 в канале для спектрального согласования под $\bar{x}_{np}(\lambda)$ наилучшими с точки зрения минимальной погрешности оказались толщины стекол, неудачные с практической позиции. Для стекла ОС-5 лучшим расчетным значением толщины оказалась толщина 0,2 мм – сильно возрастает хрупкость стекла, ухудшается однородность характеристик по площади. Толщины стекол более 5 мм использовать также не рекомендуется, т.к. сильно ослабляется входящий сигнал.

С точки зрения спектральной коррекции было бы удобнее использовать одноканальный прибор, однако более полно этот вопрос освещается далее в отдельной главе (глава 8).

4. ОЦЕНКА ИТОГОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ

В главе 2.2 показаны различные, наиболее часто используемые способы оценки спектральной погрешности. Критерий 1 f_{Iz} позволяет оценить погрешность наиболее точно и для каждого из рассматриваемых источников света со спектром $\varphi_z(\lambda)$. Эта погрешность может быть использована как для оценки методической погрешности, так и для анализа погрешности спектральной коррекции, обусловленной неидеальным подбором стёкол.

В разделе 2.2.1. было предложено использовать критерий 1 для поиска оптимального коэффициента k , а далее были рассчитаны значения методической погрешности замены кривой $\bar{x}_r(\lambda)$ на $k * \bar{z}(\lambda)$ для исследуемых спектров при выбранном значении $k=0.173$. На том этапе работы еще считалось, что спектральная коррекция под кривые сложения выполнена идеально, т.е. не рассматривалась погрешность, вносимая неидеальностью КСФ.

Погрешность спектральной коррекции, рассчитанная по критерию 1 (далее – $f_{Iспектр}$) может как увеличить, так и уменьшить методическую погрешность (далее – $f_{Iмет}$), рассчитанную также по критерию 1, т.к. эти две погрешности могут иметь разный знак. Итоговая погрешность, учитывающая $f_{Iмет}$ и неидеальность спектральных характеристик КСФ (далее – $f_{I\Sigma}$) может, таким образом, быть меньше погрешности метода $f_{Iмет}$.

На рис.22 в виде гистограммы показано соотношение погрешности метода $f_{Iмет}$ и итоговой погрешности $f_{I\Sigma} = f_{Iмет} + f_{Iспектр}$.

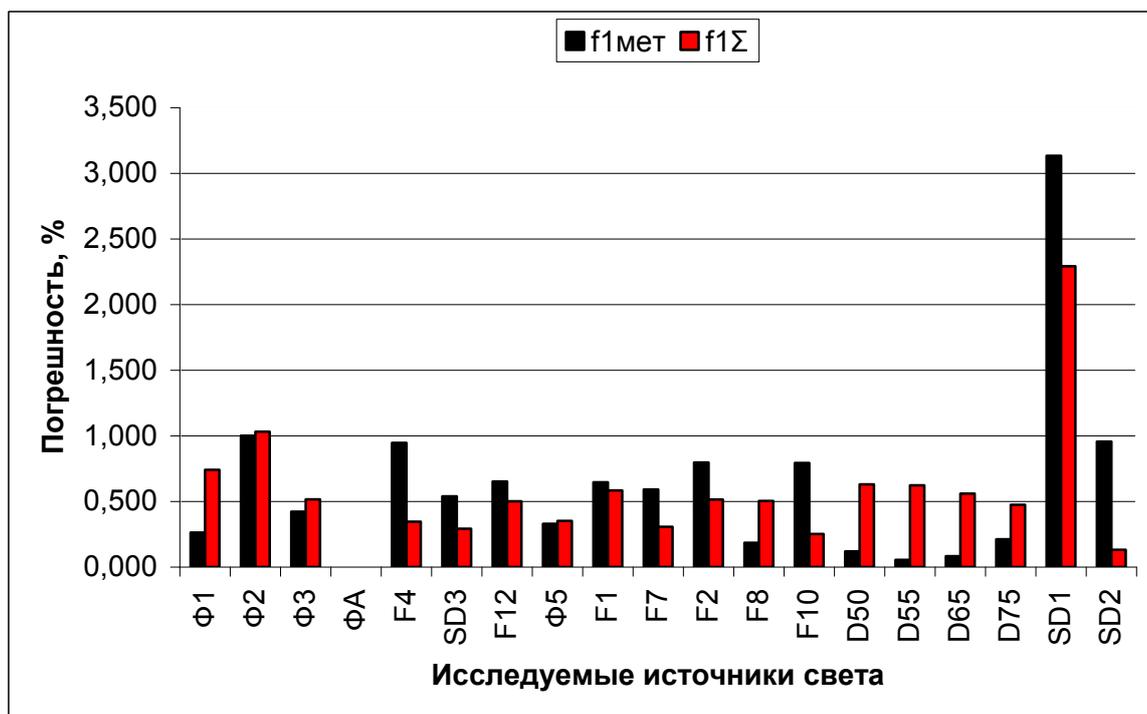


Рис.22 Погрешности $f_{I\Sigma}$ и $f_{Iмет}$

Видно, что погрешность $f_{I\Sigma}$ во многих случаях оказалась меньше, чем погрешность метода $f_{Iмет}$. Это справедливо для спектров люминесцентных ламп (кроме F8) и для спектров СД. Так происходит из-за особенностей исследуемых спектров и используемых в расчетах цветных стекол.

В таблице 5 серым цветом отмечены спектры, для которых $f_{I\Sigma}$ оказалась больше $f_{Iмет}$, и голубым – для обратной ситуации.

Таблица 5. Погрешности метода и суммарные погрешности

Спектр	Погрешность, %	
	$f_{I_{мет}}$	$f_{I_{\Sigma}}$
Ф1	0,263	0,741
Ф2	1,002	1,031
Ф3	0,423	0,516
ФА	0,000	0,000
F4	0,947	0,345
SD3	0,539	0,292
F12	0,652	0,501
Ф5	0,330	0,351
F1	0,646	0,584
F7	0,592	0,306
F2	0,797	0,515
F8	0,185	0,503
F10	0,793	0,251
D50	0,120	0,631
D55	0,055	0,623
D65	0,083	0,560
D75	0,211	0,475
SD1	3,134	2,292
SD2	0,957	0,132

Поскольку в качестве погрешности метода замены кривой $\bar{x}_l(\lambda)$ на $k^* \bar{z}(\lambda)$ логичнее использовать $f_{I_{\Sigma}}$ (метода + спектральной коррекции), можно считать, что она составляет 2,29% (т.к. она наибольшая для исследуемых спектров).

Несмотря на то, что результат работы имеет конкретное численное значение погрешности (2,29%), не совсем ясно, будет ли такая погрешность соответствовать разнице в цветности, т.е. будет ли она превышать цветовой порог при визуальном восприятии источников света и/или цветных образцов.

В [19] автором были рассчитаны так называемые «цветовые смещения», разницы в координатах цветности на диаграмме цветности МКО 1931 года, вызываемые заменой $\bar{x}_l(\lambda)$ на $k^* \bar{z}(\lambda)$ и спектральным согласованием. Не останавливаясь на процессе расчетов подробно, укажем,

что максимальная величина сдвига $\Delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ равна 0,013 ед., а в среднем она находится на уровне 0,004 ед.

Тем не менее, на мой взгляд, этого недостаточно, потому что для рядового пользователя важно знать, будет ли прибор искажать цветность источника света или цветного образца, и, если будет, то в какой области, и насколько ощутима будет эта разница в цветности.

5. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ИТОГОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ

Чтобы перевести значения цветовых смещений в величины цветовых порогов, необходимо перевести их в колориметрическую систему 1976 года с уточненными эллипсами Мак-Адама, в систему $L^*u^*v^*$. Использовались следующие формулы:

$$\begin{aligned}L^* &= 116 \times \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 \\u^* &= 13 \times L^* \times (u' - u'_{st}) \\v^* &= 13 \times L^* \times (v' - v'_{st})\end{aligned}\tag{34}$$

где

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

- координаты цветности модифицированного цветового пространства МКО 1967 года. u', u'_{st} - координаты цветности при освещении соответственно исследуемым и опорным (см. далее) источником излучения.

Расчет проводился для тех же исследуемых источников света, что в главе 4 и разделе 2.2.1. Сначала был проведен расчет для белого образца, т.е. без какого-либо цветового искажения. Рассмотрим его ниже.

Расчет без цветных образцов

В данном разделе и в последующем расчет производился для оценки итоговой погрешности $f_{I\Sigma}$. Таким образом, измеренные координаты цвета определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
Y &= \int_{0.38}^{0.78} [\varphi(\lambda) * \tau_{1_y}(\lambda) * \tau_{2_y}(\lambda) * \tau_{3_y}(\lambda) * S_{Si}(\lambda)] d\lambda \\
Z &= \int_{0.38}^{0.78} [\varphi(\lambda) * \tau_{1_z}(\lambda) * \tau_{2_z}(\lambda) * \tau_{3_z}(\lambda) * S_{Si}(\lambda)] d\lambda \\
X &= 0.173 * Z + \int_{0.38}^{0.78} [\varphi(\lambda) * \tau_{1_x}(\lambda) * \tau_{2_x}(\lambda) * \tau_{3_x}(\lambda) * S_{Si}(\lambda)] d\lambda
\end{aligned} \tag{35}$$

где $\varphi(\lambda)$ - спектральный поток излучения;

$\tau(\lambda)$ - спектральный коэффициент пропускания цветного стекла, каждое из которых предназначено для создания КСФ для коррекции под соответствующую кривую сложения;

$S_{Si}(\lambda)$ - спектральная чувствительность фотоприемника.

Каждому исследуемому источнику (Ф1-Ф5, F1-F12 по МКО + три спектра люминофорных светодиодов Cree XR-C 7090) присваивался свой опорный источник света. Он представляет собой либо модель черного тела для исследуемых излучений с цветовой температурой менее 4000К, либо источник типа D, если цветовая температура более 4000 К. Они нужны для последующего расчета координат цвета в системе $L^*u^*v^*$.

В результате расчетов по формуле (34) было получено 2 набора данных для каждого из типов источников (исследуемые и опорные). Каждый набор включает в себя по 4 комплекта значений координат цветности – 2 (u', v') для идеального случая с исходной кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$ и с идеальными КСФ и 2 (u'_n, v'_n) – для случая $\bar{x}(\lambda) = k * \bar{z}(\lambda) + \bar{x}_{np}(\lambda)$ и с реальными светофильтрами.

При таком представлении данных сложно оценить возникающую разность между координатами цветности, т.е. то самое «цветовое смещение», поэтому они не будут представлены в виде гистограмм или таблиц. Гораздо интереснее в практическом смысле будет представление разниц координат цветности u, v для реальной и идеальной ситуации для каждого из рассматриваемых источников света.

Итак, на рис. 23 представлены цветовые сдвиги с учетом знака (хотя это и не очень существенно на данном этапе) в равноконтрастной системе $L^*u^*v^*$ для двух вариантов:

- 1) Координата v' , модуль разницы между расчетом с исходной кривой $\bar{x}_n(\lambda)$ и $k^* \bar{z}(\lambda)$. Исследуемые источники света. Подпись – $v' - v'_n$;
- 2) Координата v' , модуль разницы между расчетом с исходной кривой $\bar{x}_n(\lambda)$ и $k^* \bar{z}(\lambda)$. Опорные источники света. Подпись – $v'_{st} - v'_n$.

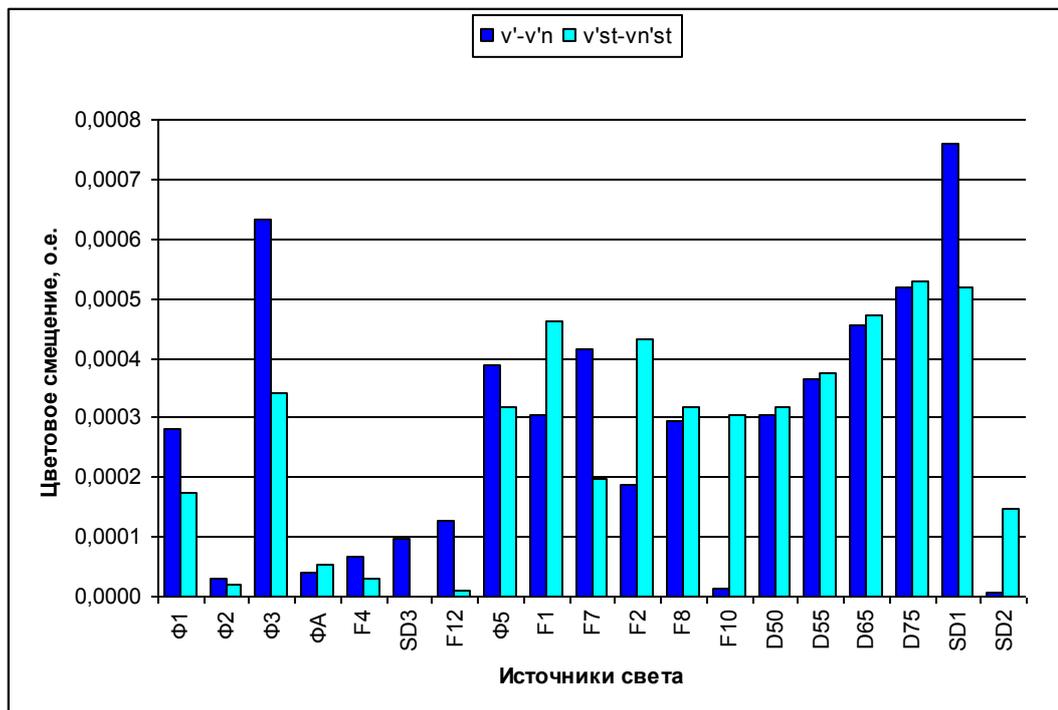


Рис 23. Модуль разниц координат цветности v в пространстве $L^*U^*V^*$

1976

Рис 24. – аналогично для координаты цветности u .

- 3) Координата u' , модуль разницы между расчетом с исходной кривой $\bar{x}_n(\lambda)$ и $k^* \bar{z}(\lambda)$. Исследуемые источники света. Подпись – $u' - u'_n$;
- 4) Координата u' , модуль разницы между расчетом с исходной кривой $\bar{x}_n(\lambda)$ и $k^* \bar{z}(\lambda)$. Опорные источники света. Подпись – $u'_{st} - u'_n$.

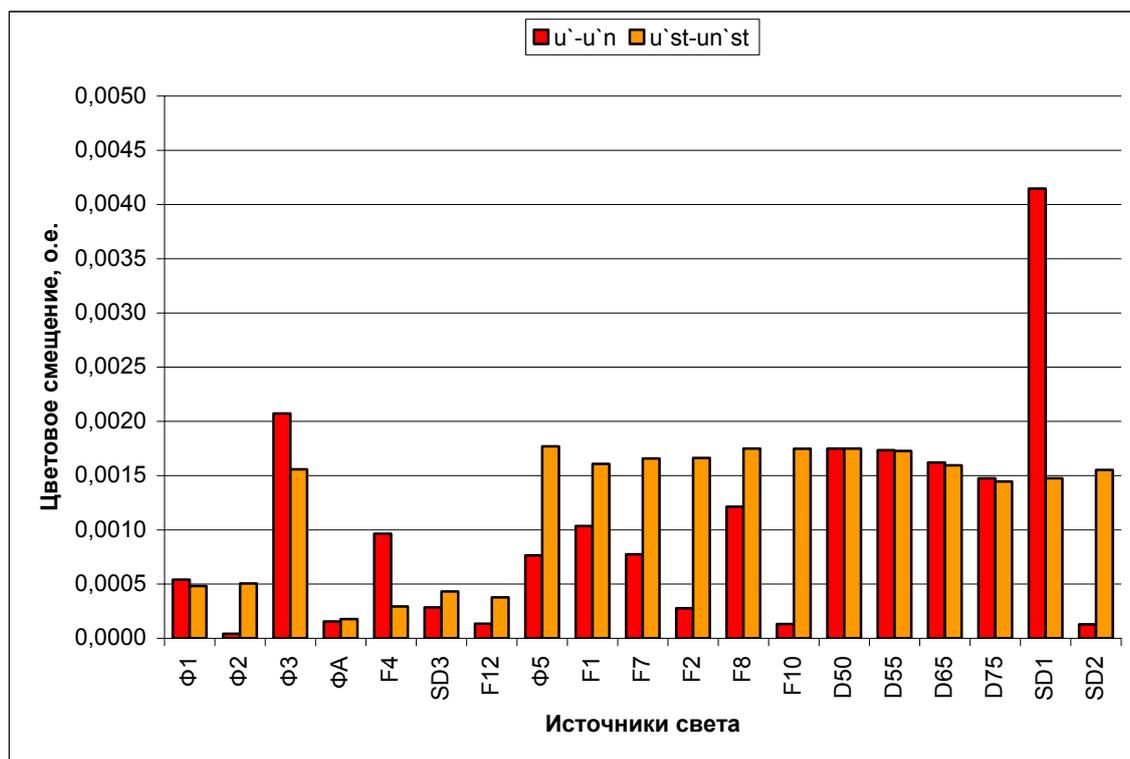


Рис 24. Модуль разниц координат цветности u в пространстве $L^*U^*V^*$

1976

Несмотря на то, что имеется численный результат цветовых смещений, это дает мало информации о визуальном восприятии такой разницы. Поэтому далее рассмотрено равноконтрастное пространство с нанесенными эллипсами Мак-Адама (рис.25). При помощи специальной программы можно с достаточно хорошей точностью рассчитать минимальный размер поперечной оси эллипса Мак-Адама.

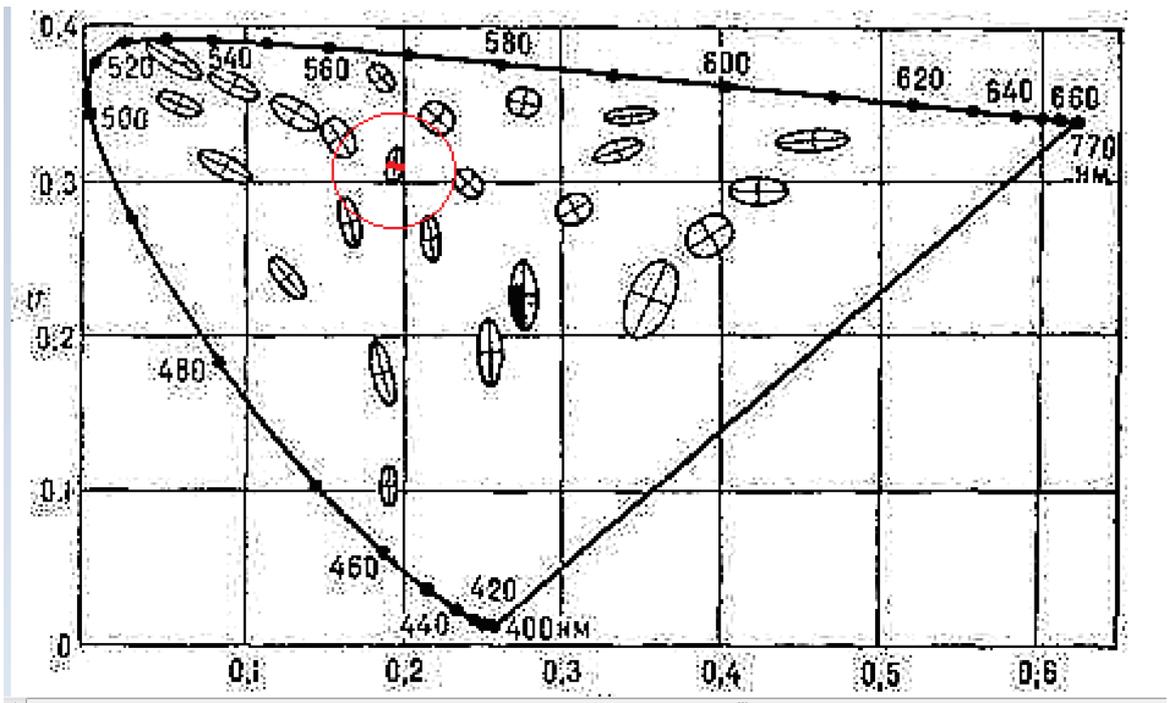


Рис.25 Равноконтрастное пространство с нанесенными эллипсами Мак-Адама

Минимальный размер эллипса Мак-Адама на рисунке – 0,0092 ед. Эллипс представляет собой область изменения цветности, еще не ощущаемой наблюдателем, т.е. 1 порог цветоразличения [1]. На рис. 23 и 24 видно, что максимальная разница между координатами цветности u^* или v^* равна 0,0042. Это в два раза меньше минимального размера минимального эллипса Мак-Адама на диаграмме цветности.

Следствием проведенного анализа является заключение, что с высокой степенью вероятности итоговая погрешность не будет приводить к ощутимой разнице в цветности даже на один порог при исследовании идеально белого образца или при изучении самосветящихся объектов.

Расчет с использованием цветных образцов

Исследование пространства цветовых порогов в случае исследования несамосветящихся объектов проводится при помощи методики CQS (15 образцов, рис.26) [21]:



Рис.26 Цветные образцы для расчета индексов R_i и Q_i . Цвета для иллюстрации рассчитаны при освещении фазой солнечного света с цветовой температурой 5000К

Связь с цветными образцами необходима, в первую очередь, для оценки искажения цветопередачи в реальных условиях, т.е. для работы не только с самосветящимися объектами, но и с цветными образцами. Методика CQS (и образцы, присущие ей) выбраны как наиболее отвечающие современным стандартам колориметрии [21].

Координаты цвета определяются по формулам:

$$\begin{aligned} Y &= \int_{0.38}^{0.78} [\varphi(\lambda) * \tau_{1_y}(\lambda) * \tau_{2_y}(\lambda) * \tau_{3_y}(\lambda) * S_{Si}(\lambda) * \rho(\lambda)] d\lambda \\ Z &= \int_{0.38}^{0.78} [\varphi(\lambda) * \tau_{1_z}(\lambda) * \tau_{2_z}(\lambda) * \tau_{3_z}(\lambda) * S_{Si}(\lambda) * \rho(\lambda)] d\lambda \\ X &= 0.173 * Z + \int_{0.38}^{0.78} [\varphi(\lambda) * \tau_{1_x}(\lambda) * \tau_{2_x}(\lambda) * \tau_{3_x}(\lambda) * S_{Si}(\lambda) * \rho(\lambda)] d\lambda \end{aligned} \quad , \quad (36)$$

где $\rho(\lambda)$ - спектральный коэффициент отражения стандартного образца.

Порядок расчета далее совпадает с таковым в предыдущем разделе, когда рассматривался белый образец. В результате были получены 4 набора разниц координат цветности $(u^`-u^`_n, v^`-v^`_n; u^`_{st}-u^`_{n\ st}, v^`_{st}-v^`_{n\ st})$.

Каждый из них представляет собой трехмерный массив (зависимость величины координаты цветности от исследуемого/опорного источника света и от цветного образца). Для того чтобы можно было удобно и корректно оценить результаты, была сделана выборка по светящим образцам по

принципу максимальной по модулю разницы между соответствующими цветовыми сдвигами. Например, для пары интересующих нас координат цветности (скажем, v' и v'_n - разница между расчетом с исходной кривой $\bar{x}_n(\lambda)$ и $k * \bar{z}(\lambda)$, исследуемые источники света) рассчитывается столбец значений разниц этих координат для 15 цветных образцов, потом был найден максимум этих значений (без учета знака). Это максимальное значение заносилось в итоговую таблицу результатов. Если максимальная разница превысит ранее найденный минимальный размер эллипса Мак-Адама – 0,0092 ед. – будет проводиться последующий анализ с рассмотрением образцов, которые вызвали это превышение.

На рис. 27 и 28 представлены цветовые сдвиги, рассчитанные согласно рассмотренному алгоритму. Четыре набора данных, соответственно, отображают максимальные по цветным образцам значения.

Рис 27:

- 1) Координаты v' , разница между расчетом с исходной кривой $\bar{x}_n(\lambda)$ и $k * \bar{z}(\lambda)$. Исследуемые источники света. Подпись – $v' - v'_n$;
- 2) Координаты v' , разница между расчетом с исходной кривой $\bar{x}_n(\lambda)$ и $k * \bar{z}(\lambda)$. Опорные источники света; Подпись – $v'_{st} - v'_{n\ st}$;

Рис. 28:

- 3) То же, координата u' . Подпись $u' - u'_n$;
- 4) То же, координата u' . Подпись $u'_{st} - u'_{n\ st}$.

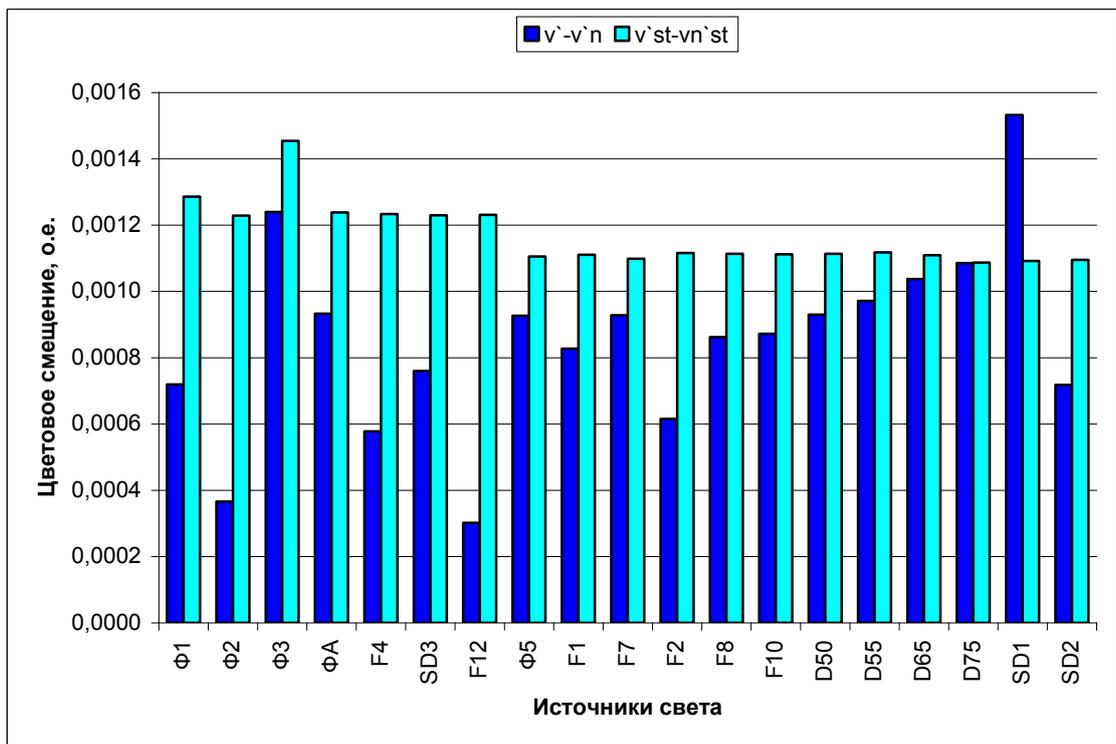


Рис. 27 Максимальная среди цветных образцов абсолютная разница координат цвета v в пространстве $L^*U^*V^*$

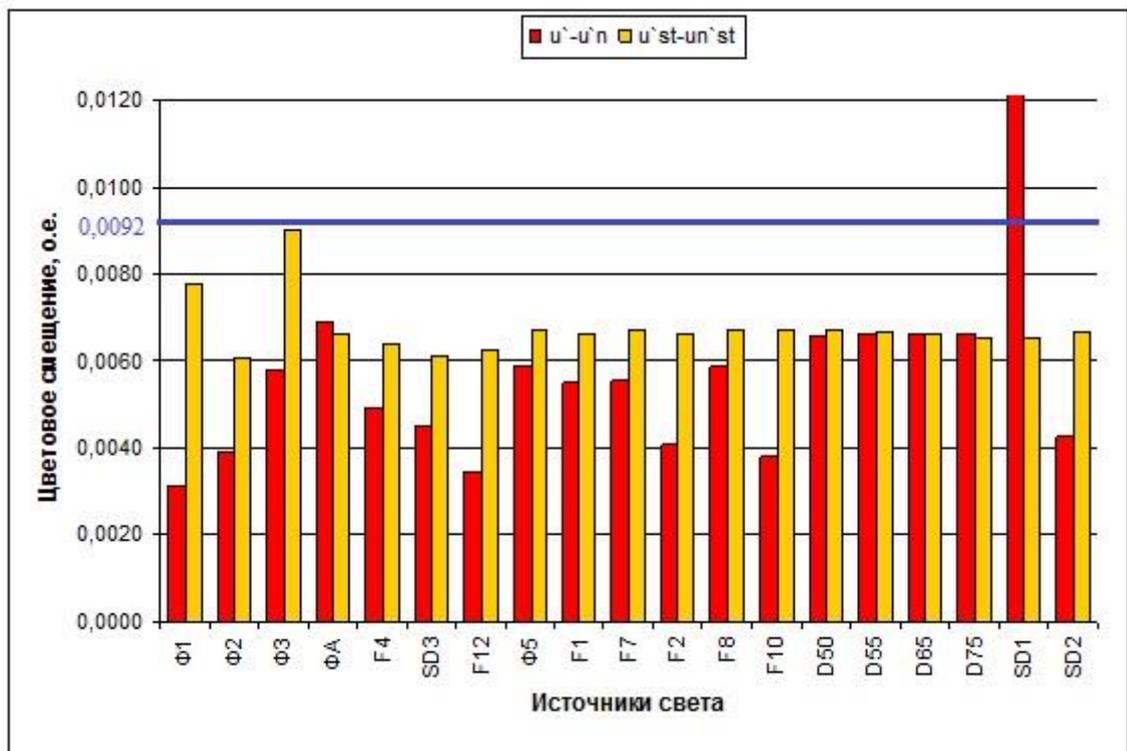


Рис. 28 Максимальная среди цветных образцов абсолютная разница координат цвета u в пространстве $L^*U^*V^*$

На рис.28 сдвиги примерно на порядок больше, чем на рис.27, что связано с тем, что это разные координаты цветности, и на координату u погрешность метода, видимо, имеет гораздо большее влияние.

Видно, что цветовое смещение координаты u опорного источника света №3 приближается к границе 0,0092 ед., но не превышает его (значение цветового смещения $u_{st}^{\prime} - u_{st}$ равно 0,0089 ед.). Исследуемый источник света № 18 (соответствует спектру излучения SD1, светодиод Cree XR-C 7090 с ЦТ = 5000К) в сочетании с некоторыми образцами приводит к разнице координат u^{\prime} и u_n большей, чем предел в 0,0092 ед. Нужно провести анализ по образцам (рис.29).

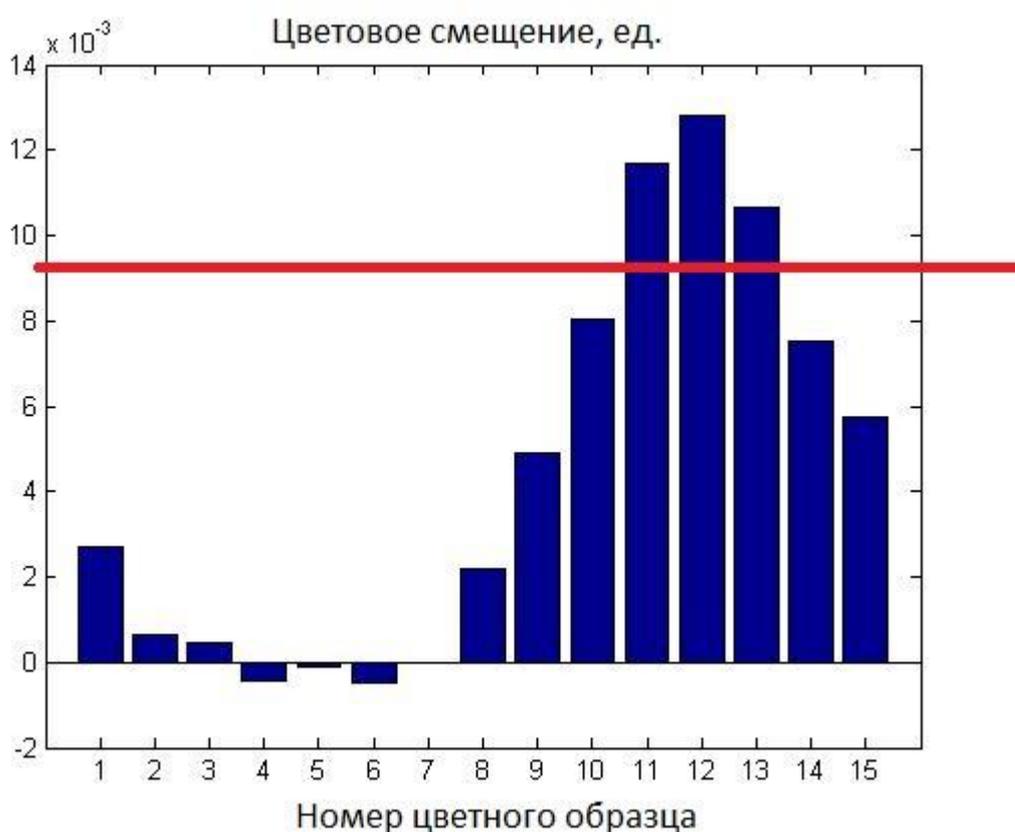


Рис. 29 Распределение разниц координат u^{\prime} и u_n по цветным образцам для исследуемого источника SD1

Излучение, отраженное от 3х из 15и исследуемых цветных образцов, вызывает разницу координат цветности большую, чем 0,0092 ед. Это образцы 11 (0,0117 ед.), 12 (0,0127 ед.) и 13 (0,0107 ед.), рис.30.

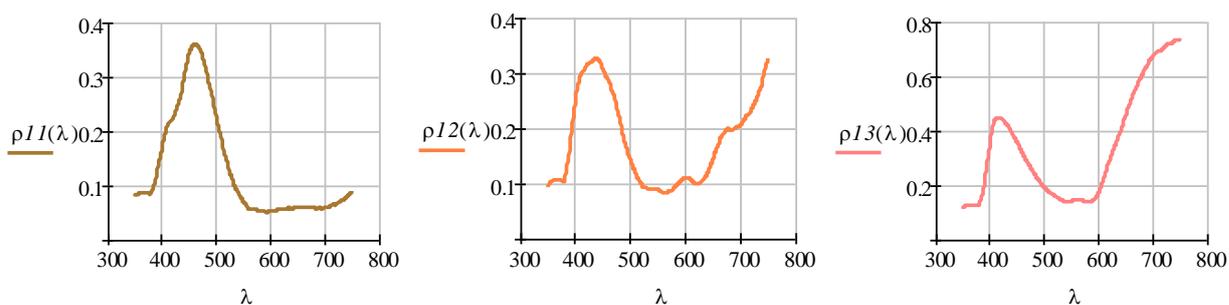


Рис. 30 Образцы, вызвавшие превышение максимально допустимой разницы координат цветности. По оси абсцисс каждого графика – длина волны, нм; по оси ординат – коэффициент отражения образца в долях.

Образцы 11-13 соответствуют различным оттенкам желто-зеленой гаммы невысокой насыщенности. Для того чтобы выяснить, будет ли данное превышение минимального размера эллипса Мак-Адама вызывать разницу в ощущении цвета, нужно в равноконтрастном пространстве отметить точки, соответствующие координатам цветности, чья разница вызвала такое смещение.

На рис.31 вновь показано равноконтрастное пространство с эллипсами Мак-Адама, на котором также нанесены координаты цветности образцов 11-13. Точки желтого цвета будут соответствовать координатам u' и $u'n$ для образца 11, оранжевого цвета – для образца 12, красного цвета – для образца 13.

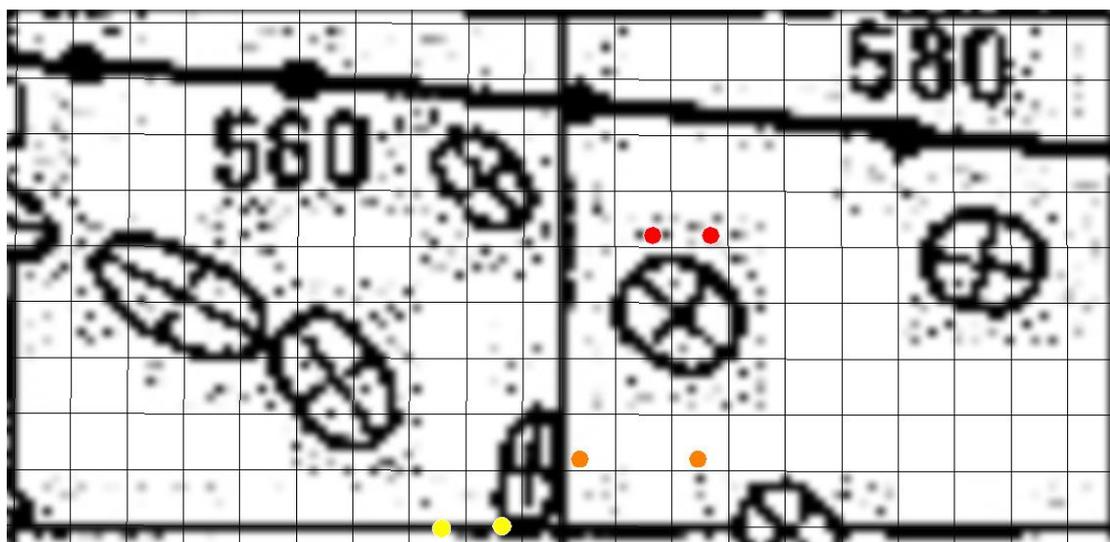


Рис.31 Увеличенная область равноконтрастного пространства с нанесенными эллипсами Мак-Адама и точками координат цветности образцов 11, 12, 13 . Выделенная область соответствует $u = 0.1 \dots 0.3$ и $v = 0.3 \dots 0.4$.

Самый маленький размер эллипса Мак-Адама на рисунке – 0,0092 ед., но минимальный размер эллипса свой для каждой зоны пространства. Так, для зоны расположения координат цвета, получившихся в результате отражения спектра SD1 от образца 11 минимальный размер эллипса равен 0.0092 ед. (смещение составляет 0,117 ед.); от образца 12, скорее, 0.0125 ед. (смещение = 0,0127 ед.); от образца 13 – тоже 0.0125 ед. (смещение = 0,0107 ед.).

Следовательно, итоговая расчетная погрешность прибора может приводить к незначительному (не более одного порога цветоразличения) изменению в визуальном восприятии цветных образцов 11 и 12 при исследовании спектров люминофорных светодиодов с высокой цветовой температурой. Однако для более точного установления этого факта необходимо проводить эксперименты с несколькими наблюдателями.

6. РАСЧЕТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПИРОМЕТРА

В главе 1.3 было показано, что о цветовой температуре источников света, подчиняющихся законам теплового излучения, можно с достаточной точностью судить по отношению спектральной плотности излучения в двух узких зонах, расположенных по краям видимого спектра. Для определения цветовой температуры этим методом в исходном фотоэлектрическом колориметре конструкции ВЭИ измеряют два тока на выходе фотоэлемента (при работе с синим (С) и красным (К) светофильтрами, «вырезающими» из излучения два узких спектральных участка). Эти светофильтры предназначены специально для расчета цветовой температуры, они расположены на отдельном поворотном диске. Значение цветовой температуры определяется по отношению токов на выходе фотоэлемента i_c и $i_{кр}$ с помощью кривой $T_{цв} = f(i_c/i_{кр})$, построенной при предварительной градуировке. Далее в разделе способ измерения цветовой температуры с использованием светофильтров К и С, будет называться «способом ВЭИ».

В настоящей главе рассматривается возможность измерения цветовой температуры излучения на основе «синего» и «красного» светофильтров, используемых для коррекции под кривые сложения $\bar{z}(\lambda)$ и $\bar{x}_{np}(\lambda)$ соответственно, далее такой способ будет называться «способом МЭИ». Сравнимым параметром является чувствительность пирометра, т.е. относительное изменение спектрального отношения $i_c/i_{кр}$ при изменении температуры на один градус. Обозначим спектральное отношение $i_c/i_{кр}$ символом R , тогда чувствительность цветового пирометра будет равна:

$$S_p = (dR / R) : dT = [1 / K] \quad (37)$$

Для колориметра конструкции ВЭИ функция $T_{цв} = f(R)$ представлена на стенде лабораторной работы, данные для расчета его чувствительности взяты из этого графика (рис.32).

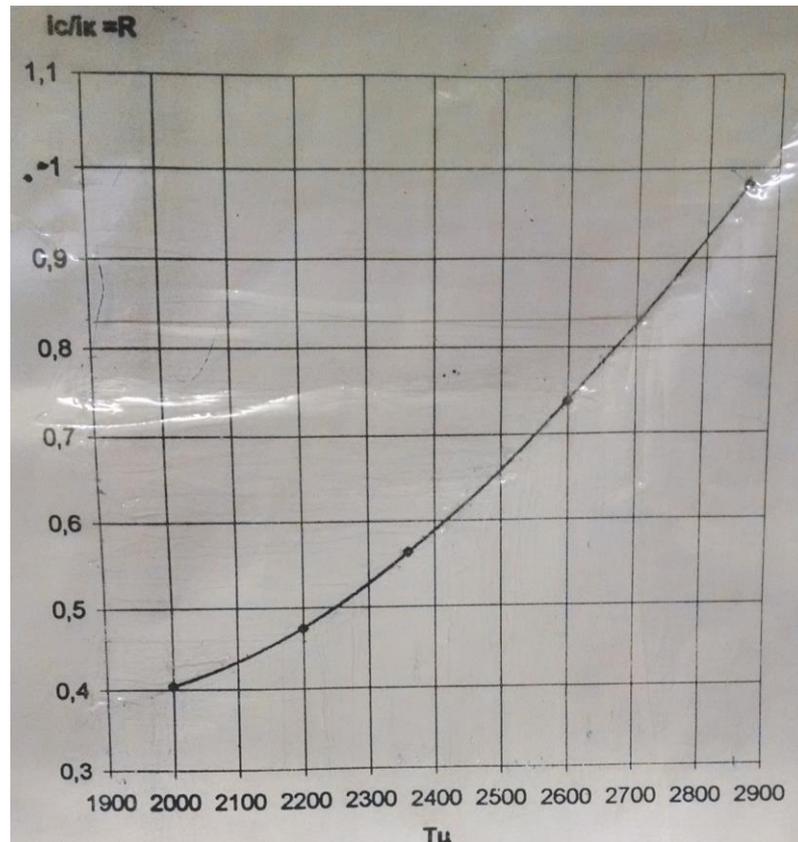


Рис.32. Зависимость $T_{ув} = f(i_c/i_{кр})$ для колориметра конструкции ВЭИ

По способу МЭИ функция $T_{ув} = f(i_c/i_{кр})$ рассчитывается для спектра излучения черного тела при температурах от 1900 К до 2900 К. Спектральная плотность излучения черного тела вычисляется по закону Планка. Значения токов i_c и $i_{кр}$ определяются по следующим формулам:

$$i_c(T) = \int_{780}^{380} \tau_{1z}(\lambda) * \tau_{2z}(\lambda) * \tau_{3z}(\lambda) * S_{Si}(\lambda) * \varphi_{чТ}(\lambda, T) d\lambda$$

$$i_{кр}(T) = \int_{780}^{380} \tau_{1x}(\lambda) * \tau_{2x}(\lambda) * \tau_{3x}(\lambda) * S_{Si}(\lambda) * \varphi_{чТ}(\lambda, T) d\lambda \quad (38)$$

На рис.33 представлены две зависимости $R = i_c/i_{кр}$: для способа ВЭИ и для способа МЭИ.



Рис.33. Зависимости $R = i_c / i_{kp}$ от цветовой температуры

Из такого графика сложно понять, какая модель цветового пирометра будет более точной, поскольку важно относительное изменение параметра R .

Для определения чувствительности на каждом участке спектра от 1900 К до 2900 К используется формула (37). Шаг определения чувствительности – 100К. В таблице 6 представлены сводные данные по чувствительности, рассчитанные по способу ВЭИ и по способу МЭИ:

Таблица 6. Величины $R=i_c/i_{кр}$ и чувствительности S_p для двух способов расчета цветовой температуры

Т, К	Способ ВЭИ		Способ МЭИ	
	$i_c/i_{кр}$	S_p	$i_c/i_{кр}$	$S_{рн}$
1900	0,376	-	0,097	-
2000	0,396	$5,05 \cdot 10^{-4}$	0,116	$1,69 \cdot 10^{-3}$
2100	0,421	$5,94 \cdot 10^{-4}$	0,138	$1,55 \cdot 10^{-3}$
2200	0,458	$8,08 \cdot 10^{-4}$	0,161	$1,43 \cdot 10^{-3}$
2300	0,505	$9,31 \cdot 10^{-4}$	0,185	$1,31 \cdot 10^{-3}$
2400	0,561	$9,98 \cdot 10^{-4}$	0,211	$1,22 \cdot 10^{-3}$
2500	0,624	$1,01 \cdot 10^{-3}$	0,238	$1,13 \cdot 10^{-3}$
2600	0,696	$1,03 \cdot 10^{-3}$	0,265	$1,05 \cdot 10^{-3}$
2700	0,772	$9,84 \cdot 10^{-4}$	0,294	$9,79 \cdot 10^{-4}$
2800	0,852	$9,39 \cdot 10^{-4}$	0,324	$9,14 \cdot 10^{-4}$
2900	0,938	$9,17 \cdot 10^{-4}$	0,354	$8,58 \cdot 10^{-4}$

Для наглядности на рис.34 чувствительности представлены в графическом виде. На рис. 35 показано отношение чувствительности проектируемого прибора к чувствительности имеющего прибора $S_{рн}/S_p$.

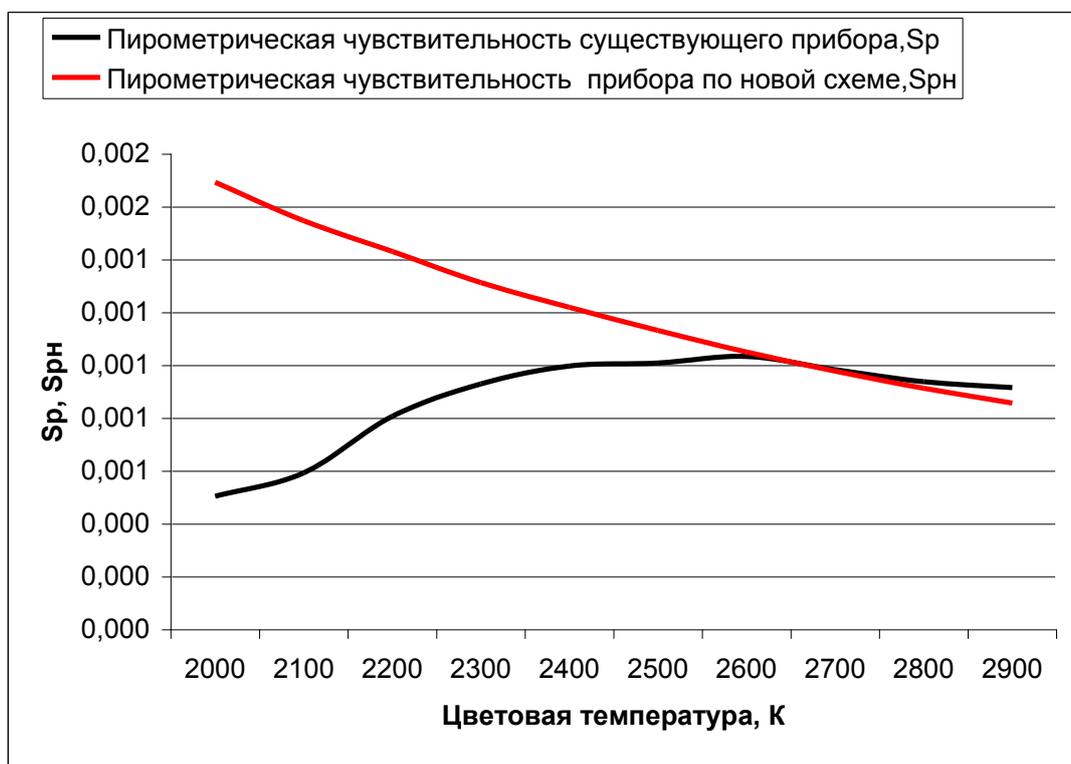


Рис.34 Пирометрическая чувствительность в функции температуры

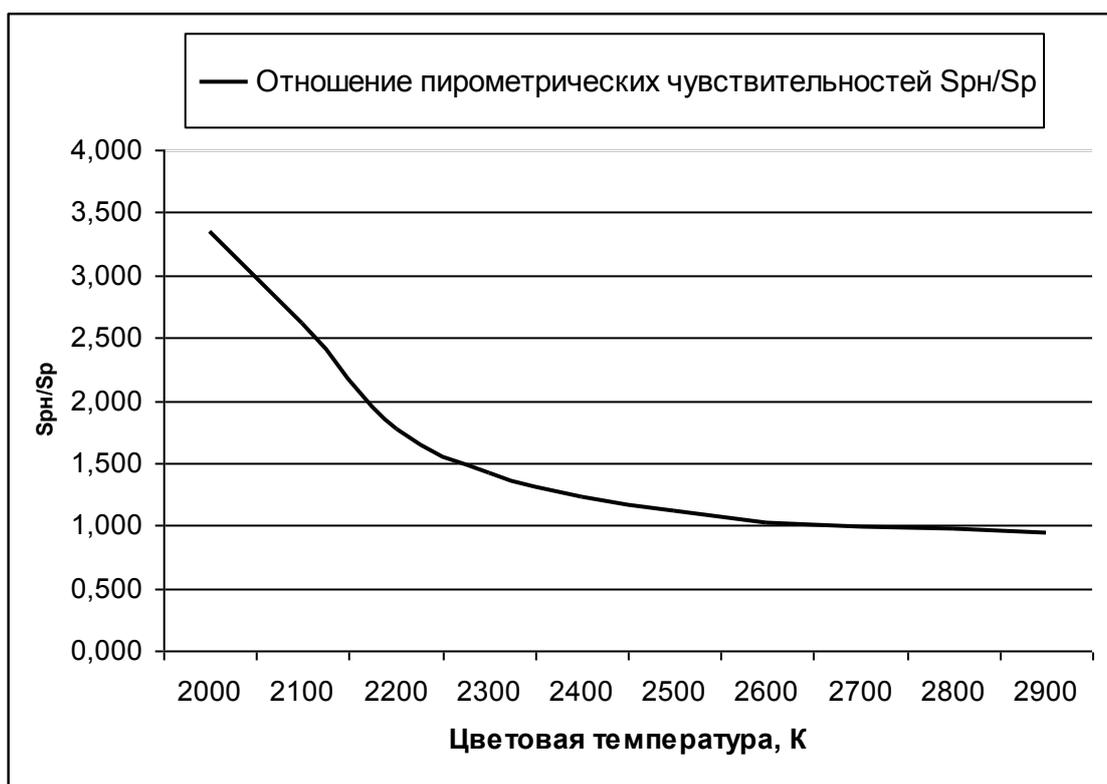


Рис.35 Отношение пиromетрических чувствительностей в функции температуры

Видно, что для цветковых температур более 2700 К чувствительность прибора, построенного принципу замены левой ветви кривой $\bar{x}(\lambda)$, немного уступает чувствительности существующего прибора конструкции ВЭИ. Однако эта разница совершенно несущественна. Например, для температуры 2900 К отношение чувствительностей («новой» к существующей) составляет лишь 0,938, так что можно считать, что на диапазоне цветковых температур 2700К-2900 К чувствительности приборов одинаковы. Для излучения же с ЦТ меньшей, чем 2700 К, чувствительность проектируемого цветкового пиromетра превышает имеющуюся, причем чем более «теплое» излучение, тем более существенной становится эта разница.

Итак, в данном разделе был рассчитан способ измерения цветовой температуры излучения методом спектрального отношения на основе «синего» и «красного» светофильтров, использующихся для коррекции под кривые сложения $\bar{z}(\lambda)$ и $\bar{x}_{np}(\lambda)$ соответственно. Выяснилось, что такой способ не уступает существующему способу измерения ЦТ с помощью двух

специальных светофильтров, а на некотором диапазоне температур даже превосходит его по чувствительности. Значит, замена специальных светофильтров на КСФ для коррекции под кривые $\bar{z}(\lambda)$ и $\bar{x}_{np}(\lambda)$ вполне оправдана, тем более что она ведет к упрощению прибора и удешевлению его конструкции. Это также является одним из несомненных преимуществ метода замены $\bar{x}_n(\lambda)$ на $k * \bar{z}(\lambda)$.

7. ГРАДУИРОВКА КОЛОРИМЕТРА

Градуировка – это метрологическая операция, при помощи которой средство измерения (колориметр) снабжают шкалой или градуировочной таблицей (кривой). Для колориметра (при линейной шкале) необходимо определить цену деления, отражающую связь сигнала на выходе прибора с величиной, подводимой к входу. Это задача калибровки. Координаты цвета с помощью колориметра определяются по формулам:

$$\begin{aligned} X &= k * C_z * i_z + C_{x_{np}} * i_x \\ Y &= C_y * i_y \\ Z &= C_z * i_z \end{aligned} \quad (39)$$

где $C_{x_{np}}, C_y, C_z$ - градуировочные коэффициенты колориметра.

По рекомендациям МКО градуировочные коэффициенты определяются экспериментально при калибровке по источнику А, спектр источника легко воспроизводится с помощью ламп накаливания.

Поскольку координаты цвета пропорциональны освещенности в плоскости соответствующего корригирующего светофильтра, в качестве образцовой лампы используется лампа типа СИС с известным значением силы света в заданном направлении. По ГОСТ 17616-82 [26] для градуировки рекомендуется использовать лампы СИС 40-100, СИС 107-500 или СИС 107-1000, имеющие известную зависимость цветовой температуры излучения от напряжения питания. В то же время, по ГОСТ 23198-94 для измерения координат цветности разрядных ламп методом фотоэлектрической колориметрии в качестве эталонной рекомендуется использовать лампу СИС 40-100.

Следовательно, зная образцовые координаты цвета лампы, можно соотнести их с показаниями колориметра i_x, i_y, i_z и вывести градуировочные коэффициенты:

$$C_x = \frac{(X_A - k * C_z * i_{ZA})}{i_{xA}}, C_y = \frac{Y_A}{i_{yA}}, C_z = \frac{Z_A}{i_{zA}} \quad (40)$$

Далее в этой главе будут рассчитаны теоретические градуировочные коэффициенты колориметра. Это не может заменить экспериментальную калибровку, т.к. фактические характеристики приемника излучения и СФ могут отличаться от заложенных в расчеты. Однако такой расчет помогает определить предварительную оценку соотношения градуировочных коэффициентов, спрогнозировать значения координат цветности при работе с любыми спектрами еще на этапе проектирования прибора. Конечно, после физического завершения модернизации прибора коэффициенты должны быть уточнены экспериментально.

Градуировочные коэффициенты рассчитываются для случая одноканального прибора, поскольку для трехканального они были рассчитаны в [19]. В качестве приемника излучения использован фотодиод Hamamatsu S1087.

$$C_x = \frac{X_A - k * C_{zA} * i_{zA}}{i_{x_{npA}}} = \frac{\int_{0.38}^{0.78} (\bar{x}_l(\lambda) + \bar{x}_{np}(\lambda)) * \varphi_A(\lambda) d\lambda - 0.173 * \int_{0.38}^{0.78} \bar{z}(\lambda) * \varphi_A(\lambda) d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} S_{x_{np}}(\lambda) * \varphi_A(\lambda) d\lambda}$$

$$C_y = \frac{Y_A}{i_{yA}} = \frac{\int_{0.38}^{0.78} \bar{y}(\lambda) * \varphi_A(\lambda) d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} S_y(\lambda) * \varphi_A(\lambda) d\lambda}$$

$$C_z = \frac{Z_A}{i_{zA}} = \frac{\int_{0.38}^{0.78} \bar{z}(\lambda) * \varphi_A(\lambda) d\lambda}{\int_{0.38}^{0.78} S_z(\lambda) * \varphi_A(\lambda) d\lambda}$$

где

$$S_{x_{np}}(\lambda) = \tau_{1_{x_{np}}}(\lambda) * \tau_{2_{x_{np}}}(\lambda) * \tau_{3_{x_{np}}}(\lambda) * S_{Si}(\lambda)$$

$$S_y(\lambda) = \tau_{1_y}(\lambda) * \tau_{2_y}(\lambda) * \tau_{3_y}(\lambda) * S_{Si}(\lambda)$$

$$S_z(\lambda) = \tau_{1_z}(\lambda) * \tau_{2_z}(\lambda) * \tau_{3_z}(\lambda) * S_{Si}(\lambda)$$

(41)

Теперь градуировочные коэффициенты можно рассчитать. Они будут равны:

$$\begin{aligned} C_x &= 32.19 \\ C_y &= 5.84 \\ C_z &= 59.13 \end{aligned} \quad (42)$$

Проверим градуировочные коэффициенты. Предположим, изучаемой лампой является люминесцентная лампа производства компании Osram LUMILUX T5 HE 28W/840. Спектр лампы представлен на рис.36 [27].

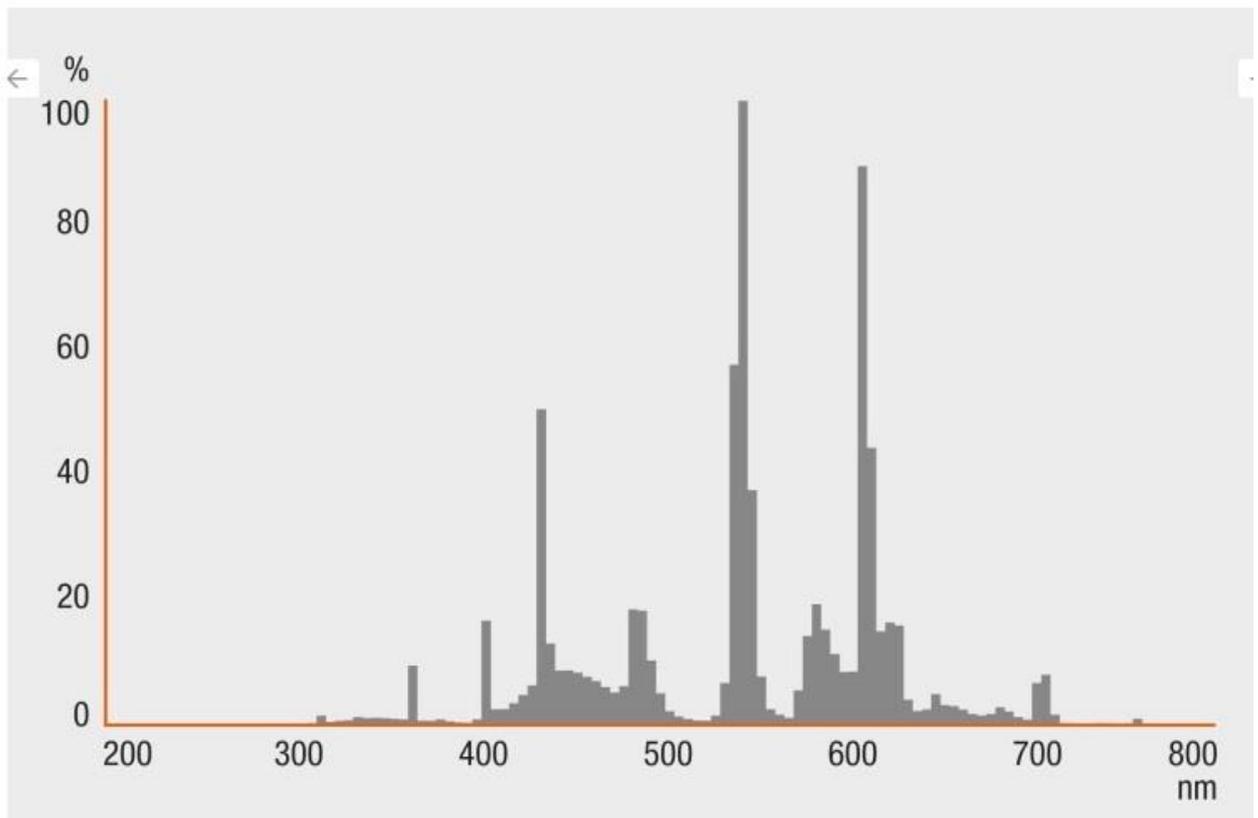


Рис.36. Относительное спектральное распределение излучения лампы Osram LUMILUX T5 HE 28W/840 (Spectral power distribution)

Спектральное распределение интенсивности излучения в таком виде является относительным, однако это не является препятствием для расчета координат цветности излучения. Для этого необходимо ввести нормирующий множитель M_φ , переводящий поток излучения лампы $\varphi_{отн}(\lambda)$ в абсолютные единицы, который при расчете координат цветности сократится.

Так, значения токов i_x, i_y, i_z будут равны:

$$i_y = M_\varphi * \int_{0.38}^{0.78} [\tau_{1_y}(\lambda) * \tau_{2_y}(\lambda) * \tau_{3_y}(\lambda) * S_{Si}(\lambda)] * \varphi_{омн}(\lambda) d\lambda = M_\varphi * 3,2 * 10^{-3}$$

$$i_z = M_\varphi * \int_{0.38}^{0.78} [\tau_{1_z}(\lambda) * \tau_{2_z}(\lambda) * \tau_{3_z}(\lambda) * S_{Si}(\lambda)] * \varphi_{омн}(\lambda) d\lambda = M_\varphi * 0,19 * 10^{-3} \quad (43)$$

$$i_x = 0,173 * i_z + M_\varphi * \int_{0.38}^{0.78} [\tau_{1_x}(\lambda) * \tau_{2_x}(\lambda) * \tau_{3_x}(\lambda) * S_{Si}(\lambda)] * \varphi_{омн}(\lambda) d\lambda = M_\varphi * 0,56 * 10^{-3}$$

Используя полученные выше градуировочные коэффициенты, рассчитаем координаты цветности излучения:

$$X = k * C_z * i_z + C_x * i_{x_{np}} = M_\varphi * 10^{-3} (0,173 * 59,13 * 0,19 + 32,19 * 0,56) = M_\varphi * 19,9 * 10^{-3}$$

$$Y = C_y * i_y = M_\varphi * 10^{-3} * 5,84 * 3,2 = M_\varphi * 10^{-3} * 18,69$$

$$Z = C_z * i_z = M_\varphi * 10^{-3} * 59,13 * 0,19 = M_\varphi * 10^{-3} * 11,23 \quad (44)$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = 0,401$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = 0,375$$

Также сравним полученные координаты цветности с рассчитанными теоретически:

$$X = \int_{0.38}^{0.78} (\bar{x}_l(\lambda) + \bar{x}_{np}(\lambda)) * \varphi_{Иссл}(\lambda) d\lambda = 3887$$

$$Y = \int_{0.38}^{0.78} \bar{y}(\lambda) * \varphi_{Иссл}(\lambda) d\lambda = 3806$$

$$Z = \int_{0.38}^{0.78} \bar{z}(\lambda) * \varphi_{Иссл}(\lambda) d\lambda = 2292 \quad (45)$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = 0,389$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = 0,381$$

Нанесем координаты цветности на диаграмму цветности МКО. Синяя точка соответствует координатам цветности, рассчитанным с помощью градуировочных коэффициентов, красная точка соответствует координатам цветности, рассчитанным теоретически (рис.37)

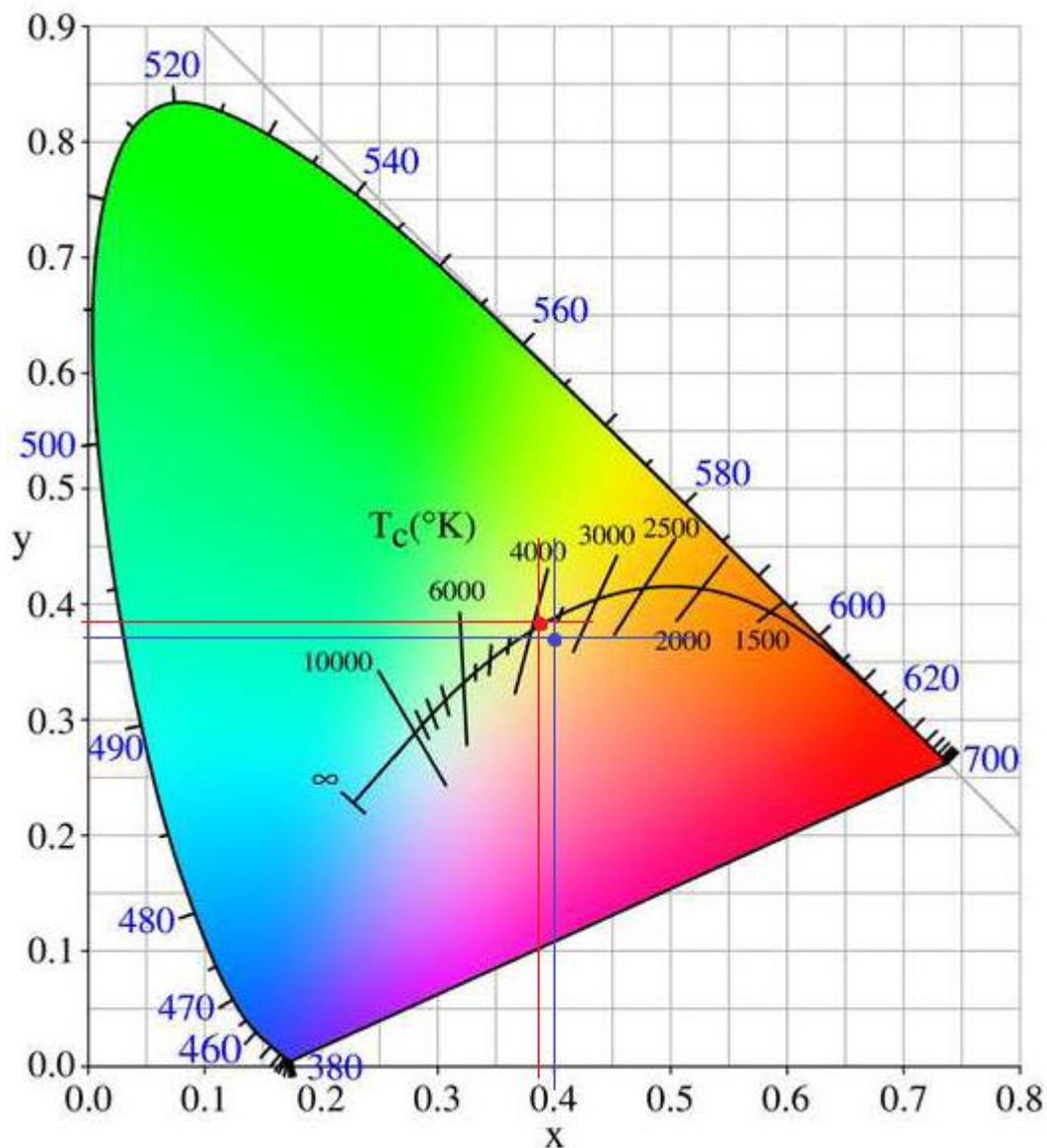


Рис.37. Диаграмма цветности МКО с нанесенными на нее координатами цветности исследуемой лампы

Видно, что в обоих случаях полученные координаты цветности лампы LUMILUX T5 HE 28W/840 пересекаются в точке с ЦТ, близкой к 4000К, что является хорошим результатом. При этом теоретические координаты цветности ближе к истинному значению цветовой температуры лампы, что кажется вполне логичным.

8. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КОНСТРУКЦИИ ПРИБОРА

В главе 1.2 описано, что спектрально согласованные фотоэлектрические колориметры конструктивно делятся на два типа – одноканальные (поочередного действия) и трехканальные (одновременного действия).

Строение одноканального колориметра было подробно рассмотрено на примере конструкции прибора ВЭИ, которая является общей схемой построения таких устройств. В настоящее время более распространенными являются трехканальные колориметры, поэтому рассмотрим их конструкцию немного подробнее.

Одной из главных задач является создание трех оптических каналов для передачи сигнала. На рис. 4 было показано, как это можно сделать с помощью небольших зеркал. Зеркала накладывают некоторые ограничения – прибор не рекомендуется двигать, переворачивать, а тем более переносить, потому что это может повлиять на расположение зеркал и привести к неправильному перераспределению светового потока. К тому же, для исключения вышеуказанной погрешности, прибор надо регулярно калибровать.

Существуют другие, современные способы светоделения. Они основаны на применении световодов. Световод – это закрытое устройство для направленной передачи света. Наиболее перспективный и широко применяемый в настоящее время тип световодов - гибкий диэлектрический волоконный световод с низкими оптическими потерями, позволяющий передавать свет на большие расстояния. В простейшем варианте он представляет собой тонкую нить из оптически прозрачного материала (рис.38). Сердцевина с радиусом a_1 имеет показатель преломления n_1 , а оболочка с радиусом a_2 имеет показатель преломления $n_2 < n_1$.

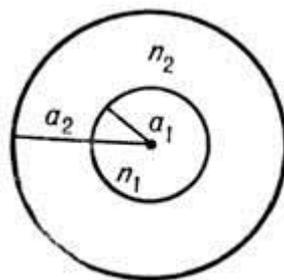


Рис. 38. Схематическое изображение световода, разрез

Лучи, входящие в сердцевину под определенным углом к оси световода, испытывают полное внутреннее отражение на поверхности раздела сердцевины и оболочки и распространяются только по сердцевине. Наименьший угол падения, при котором наблюдается полное внутреннее отражение (предельный или критический угол) определяется из выражения:

$$\sin \sigma = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (46)$$

Значит, пройдут световод только те лучи, которые падают на его боковую поверхность под углом, равным или превышающим угол полного отражения.

Достоинствами световодов являются:

- Возможность передачи сигнала на любое расстояние;
- Малые оптические потери;
- Возможность конструирования миниатюрных приборов;
- Простое и точное разделение светового потока на нужное количество каналов;
- Характер распределения света в оптических каналах не зависит от положения прибора в пространстве.

Большинство современных трехканальных колориметров построено с применением оптического волокна, например, рассмотренный в главе 1.2 колориметр Chroma Meter CS-100A.

Несмотря на все достоинства трехканальных колориметров, построенных на основе световодов, одноканальные приборы также имеют свои преимущества:

- Простота конструкции;

- Отсутствие необходимости регулярной градуировки (см. главу 1.2);
- Меньшее количество частей прибора (один приемник излучения вместо трех, один регистрирующий элемент и блок обработки сигнала), что делает его дешевле по сравнению с трехканальным прибором [4]. Однако блок, при помощи которого производится механическая смена СФ, может оказаться довольно дорогостоящим, что сделает разницу в цене минимальной.

Трехканальные колориметры выигрывают в случае, если есть необходимость измерения нестабильных источников света (импульсных ламп, экранов кинескопов), если нужно построить компактный и переносной прибор с малыми оптическими потерями. В данной работе стоит задача увеличения точности измерений существующего одноканального прибора, улучшения его метрологических и эксплуатационных характеристик. Прибор используется для учебных работ, поэтому исследование нестандартных источников света (импульсных, крайне маломощных) не предусмотрено.

Таким образом, для решения поставленной задачи сохранение конструкции прибора будет, вероятно, более рациональным шагом. Необходима лишь смена приемника излучения, корректирующих светофильтров, а также замена регистрирующего устройства и блока обработки данных на более современные аналоги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной задачей и по результатам литературного обзора в данной работе предложен способ модернизации фотоэлектрического колориметра конструкции ВЭИ, основанный на замене приемника излучения на кремниевый фотодиод, а также на замене метода воспроизведения кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$.

Проведен обзор литературы по данной тематике. Впервые выполнен обстоятельный анализ методической погрешности, возникающей при замене кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$. Подобраны корректирующие светофильтры, обеспечивающие пропорциональность сигнала координате цвета, с применением отечественной и зарубежной базы цветных стекол, и рассчитаны их оптимальные параметры для наилучшего качества спектральной коррекции с минимальными погрешностями.

Для наиболее полной оценки возникающих погрешностей использован новый подход, заключающийся в сравнении цветовых смещений, вызванных этими погрешностями, с эллипсами Мак-Адама. Это позволило определить, вносят ли вышеупомянутые смещения разницу в цветности, осязаемую глазу, т.е. превышают ли они цветовой порог.

Проведен предварительный расчет градуировочных коэффициентов колориметра, необходимых для расчета координат цветности источников света и цветных образцов. На примере реального спектра люминесцентной лампы проведена проверка этих коэффициентов, доказано, что точность расчета градуировочных коэффициентов удовлетворительна.

Для определения цветовой температуры методом спектрального отношения предложения использовать корректирующие светофильтры для коррекции под кривые сложения $\bar{x}_{np}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ соответственно. Доказано, что использование этих СФ вместо специальных стекол К и С, расположенных на отдельном поворотном диске, повышает

чувствительность пирометра спектрального отношения для ЦТ менее 2700 К, а для температур более 2700 К чувствительность проектируемого пирометра совпадает с чувствительностью существующего прибора. Описаны варианты конструкции колориметра, выбрана наиболее рациональная схема построения прибора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

6. Мешков В.В., Матвеев А.Б., Основы светотехники, ч.2, М.:Энергоатомиздат, 1989
7. <http://www5.konicaminolta.eu/measuring-instruments/products/colour-measurement/spectrophotometers-bench-top/cm-5/introduction.html>
8. Петров В.М., Шестопалова И.П., Меламед О.П., Цветовые измерения, лабораторные работы, «Градуировка зрительного колориметра», М.: Издательский дом МЭИ, 2007
9. Кривошеев М.И., Кустарев А.К., Цветовые измерения, М.:Энергоатомиздат, 1990
10. Гуревич М.М., Цвет и его измерение, М. – Л., 1950
11. <http://www5.konicaminolta.eu/measuring-instruments/products/light-display-measurement/luminance-chromaticity-meters/cs-100a/introduction.html>
12. <http://www.lmt-berlin.de/en/c1210.html>
13. Петров В.М., Шестопалова И.П., Меламед О.П., Цветовые измерения, лабораторные работы, «Измерение цвета с помощью фотоэлектрического колориметра» М.: Издательский дом МЭИ, 2007
14. Курс лекции по фотометрии Петрова В.М., 2010
15. Курс лекции по фотометрии Петрова В.М., 2011
16. Каталог «Цветное оптическое стекло и особые стекла» под ред. Петровского Г.Т., М.: Дом оптики 1990
17. Журнал «Светотехника», Хазанов В.С., Игнатъев В.Г., Машковская Т.Я год 1983 № 4 статья «Регламентация качества спектральной коррекции фотометров»
18. Schrodinger E. Grundlinien einer Theorie der Farbenmetric im Tagessehen//Ann.d.Psys.1920. Bd 63. S. 397-456, 489-520

19. Mac Adam D.L. Projective transformations of I.C.I. color specifications//JOCA. 1937. Vol.27. P.294; Specification of small chromaticity differences//JOCA. 1943. Vol.33. P.18; The graphical representation of small color differences//JOCA. 1943. Vol.33. P.675-679.
20. Гордов А.Н. Основы пирометрии, М.: Издательство «Металлургия», 1971
21. Мирошниченко В.И., Махров В.В. Методы и средства оптической пирометрии: Учеб.пособие. – М.:Издательство МЭИ, 2004
22. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/nuclsynt/n03.htm>
23. CIE 15:2004 Technical report. Colorimetry. 3rd edition.
24. Ладилова И.А. Модернизация фотоэлектрического колориметра: бакалаврская работа. НИУ МЭИ, Москва, 2012.
25. http://www.schott.com/advanced_optics/english/filter/index.html
26. http://www.led-e.ru/articles/svetodiod/2011_4_32.php
27. <http://www.konicaminolta.eu/measuring-instruments.html>
28. <http://www.konicaminolta.eu/measuring-instruments/products/colour-measurement/chroma-meters>
29. <http://www.lmt-berlin.de/en/ocolori.html>
30. http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s1087_etc_kspd1039e03.pdf
31. ГОСТ 17616-82 «Лампы электрические. Методы измерения электрических и световых параметров».
32. http://www.osram.ru/osram_ru/products/lamps/fluorescent-lamps/fluorescent-lamps-t5/lumilux-t5-he/index.jsp