

Глава 7. ИЗМЕРЕНИЕ ЦВЕТА

Колориметрия - наука о методах измерения и количественного выражения цвета.

Одно из главных требований метрологии цвета - результаты измерений должны быть однозначными и воспроизводимыми. Под однозначностью понимают способность одной и той же величины всегда показывать одинаковые значения, а под воспроизводимостью - сопоставимость полученных результатов измерений. Для удовлетворения этих условий необходимо, чтобы измерения проводились в одних и тех же условиях, принятых за норму.

Колориметрическая система - совокупность нормированных условий измерений цвета. В колориметрии нормируют те условия, которые непосредственно влияют на результат: цветность основных излучений, их количества, уровень яркости, размеры фотометрического поля.

Принцип построения колориметрических систем основывается на одном из законов Грассмана, согласно которому любой Цвет может быть выражен тремя, если они линейно независимы.

В результате цветовых измерений определяются три числа, т. н. цветовые координаты, полностью определяющие цвет при некоторых строго стандартизованных условиях его рассматривания. Цветовые координаты одного и того же цвета относительно разных основных триад различны. Числа координат представляют собой количества, в которых необходимо смешать три *основные цвета*, чтобы получить данный цвет.

7.1. Цветовая система RGB

Первая колориметрическая система *RGB* была предложена и принята в 1931 г. международной комиссией по освещению (МКО), в литературе часто вместо МКО используется аббревиатура CIE от французского Commission Internationale de l'Éclairage). Выбор основных цветов этой системы осуществлялся исходя из следующих требований.

1. Выбранные основные цвета должны легко воспроизводиться.

2. Каждый из выбранных основных излучений должен возбуждать по возможности лишь одну группу цветоощущающих рецепторов.

Учитывая год разработки первой колориметрической системы, следует отметить, что в то время наиболее воспроизводимыми считались излучения газосветных ламп, из которых с помощью светофильтров легко выделялись монохроматические излучения. В связи с этим CIE в качестве основных были выбраны излучения:

красное ($\lambda_R = 700$ нм), выделяемое красным светофильтром из лампы накаливания;

зеленое ($\lambda_G = 546,1$ нм), выделяемое из линейчатого спектра ртутной лампы;

синее ($\lambda_B = 435,8$ нм) - линия также спектра ртутной лампы.

Цвета этих излучений получили соответственно названия *R*(red), *G*(green), *B*(blue), а колориметрическая система - *CIERGB*.

Количественные характеристики основных цветов *CIERGB* выражают как световыми, так и энергетическими величинами. Для колориметрических измерений удобнее выбирать единицы световых величин таким образом, чтобы одинаковые количества основных давали белый цвет. Это один из основных принципов синтеза в колориметрии.

Экспериментально было установлено, что это возможно при соотношении яркостей соответствующих цветов $R:G:B = 1:4,59:0,06$. Эти качества основных излучений получили название яркостных коэффициентов: $L_R = 1$; $L_G = 4,59$; $L_B = 0,06$

Яркости пропорциональны световым потокам и можно считать, что при соотношении световых потоков 1:4,59:0,06 будет также получен белый цвет. Это позволяет выразить количества основных световых потоков в люменах:

$$F_R = 680 \text{ лм}, F_G = 3121 \text{ лм}, F_B = 41 \text{ лм}.$$

Зная связь между световым потоком и потоком излучения можно выразить основные R, G, B в энергетических единицах - ваттах. Получим: $R = 243,9 \text{ Вт}$, $G = 4,66 \text{ Вт}$ и $B = 3,38 \text{ Вт}$.

Это мощности единичных световых потоков.

На рис. 7.1, а изображена условная гипсовая призма, грани которой названы полями сравнения (это простейший светоизмерительный прибор). Одно из полей сравнения будем освещать каким-либо хроматическим цветом (обозначим его буквой \mathcal{C}), а второе — тремя основными цветами: красным (R), зеленым (G) и синим (B).

Белый гипс неизбирательно отражает белый свет, поэтому первое поле сравнения будет иметь такой же цвет, как и освещающий его светопоток \mathcal{C} , и будет иметь яркость, определяемую величиной светового потока, отраженного от этого поля сравнения.

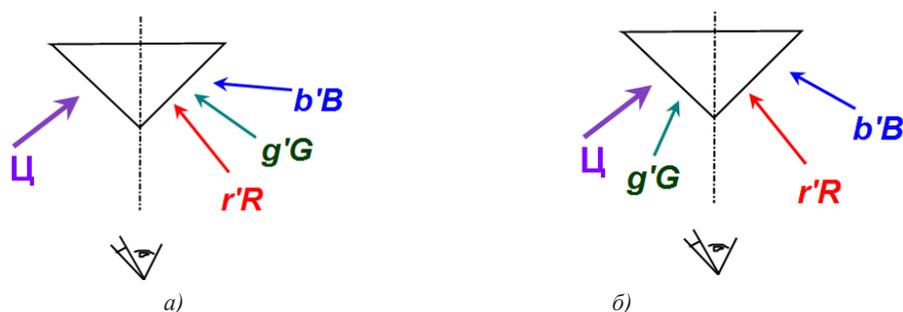


Рис. 7.1. Схема простейшего цветоизмерительного прибора

Условие тождественности цвета двух полей сравнения можно записать следующим образом:

$$\mathcal{C} = r'R + g'G + b'B$$

Написанное уравнение, называемое цветовым уравнением, показывает, что для получения цвета, тождественного с цветом \mathcal{C} , надо смешать

r' единиц красного цвета R , g' зеленого цвета G и b' синего цвета B .

Таким образом, r' , g' и b' являются **коэффициентами цветового уравнения**, они показывают, сколько единиц каждого из основных цветов надо взять, чтобы получить данный цвет \mathcal{C} и носят название **координат цвета**.

Произведения $r'R$, $g'G$ и $b'B$ являются составляющими цвета \mathcal{C} и носят название **цветовых составляющих**.

Опыты смешения цветов показывают, что для целого ряда цветов \mathcal{C} для получения равенства обоих полей сравнения по цветности и яркости к цвету \mathcal{C} надо прибавить еще некоторое количество одного из основных цветов (рис. 7.1, б).

Например, для одного из таких цветов \mathcal{C} цветовое уравнение будет иметь вид

$$\mathcal{C} + g'G = r'R + b'B$$

Удобно пользоваться относительными значениями координат цвета, являющимися отношением каждой из координат цвета r' , g' и b' к их сумме $r'+g'+b'$.

Относительные значения координат цвета носят название **координат цветности** обозначаются r , g и b и вычисляется по следующим формулам:

$$r = r'/(r'+g'+b'), \quad g = g'/(r'+g'+b'), \quad b = b'/(r'+g'+b')$$

$$\text{Очевидно, что } r'+g'+b'=1$$

Итак, качественная характеристика цвета (цветность) определяется тремя координатами цветности r , g и b , в сумме равными единице. Исходя из этого, любой цвет может быть изображен графически точкой внутри или вне равностороннего треугольника, имеющего высоту, равную единице, т.к. алгебраическая сумма (т. е. с учетом знака) перпендикуляров, опущенных из любой точки, находящейся внутри или вне такого треугольника, на его стороны, равна его высоте. Примем высоту за единицу (рис. 7.2).

В вершинах такого цветового треугольника расположены основные цвета R , G , B . Все цвета, которые могут быть получены непосредственным смешением этих цветов размещаются внутри цветового треугольника (рис. 7.2, а). Поскольку сумма координат цветности также равна единице, то каждый из перпендикуляров, может рассматриваться как одна из координат цветности. Все три координаты – положительны. В центре тяжести цветового треугольника находится точка E , соответствующая белому цвету.

На сторонах цветового треугольника расположены цвета

Цвета, которые не могут быть получены непосредственным смешением цветов R , G , B располагаются вне цветового треугольника (рис. 7.2, б). В этом случае перпендикуляры, опущенные из точки цвета на стороны треугольника, также равны соответствующим координатам цветности и в сумме равны единице, но одна из координат или две принимает отрицательное значение. Цвет \mathcal{C} , отмеченный на рисунке 7.2, б имеет отрицательную координату цветности r .

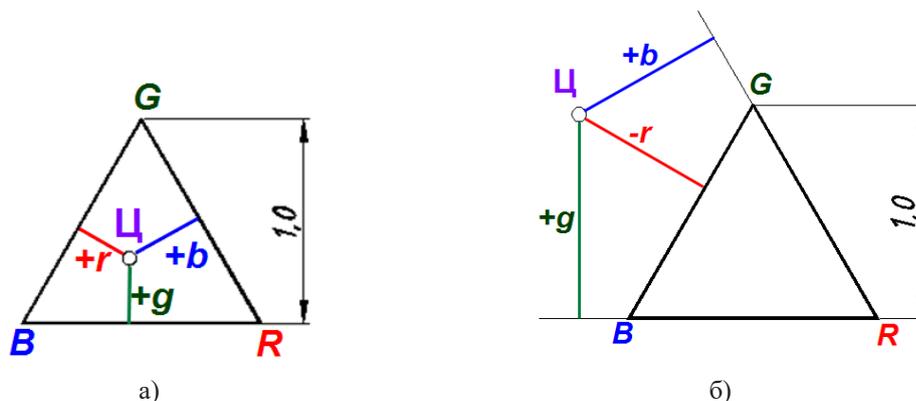


Рис. 7.2. Изображение цвета с помощью цветового треугольника

Цвета, получающиеся в результате смешения двух цветов, расположены в цветовом треугольнике на прямой линии, соединяющей точки, соответствующие смешиваемым цветам. На биссектрисах углов треугольника расположены цвета, получающиеся смешением основных цветов с белым цветом E , который находится в центре тяжести треугольника.

Для получения координат цветности r , g и b для всех остальных спектральных цветов, были проведены лабораторные исследования, которые заключались в уравнении цвета двух полей сравнения при освещении одного из них последовательно спектральными (монохроматическими) излучениями всей видимой области спектра через каждые 5 нм, а второго — комбинациями основных цветов R , G и B .

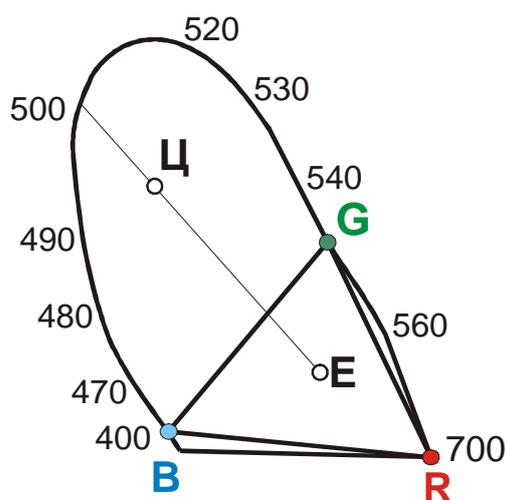


Рис. 7.3. Цветовой график в системе определения цвета RGB

На рисунке 7.3 представлен цветовой треугольник с нанесенной линией спектральных цветностей по данным исследованиям. Цифры вдоль линии спектральных цветностей — это длины волн в нанометрах соответствующих цветов.

Как Вы видите, все цвета, кроме основных R , G и B , расположены за пределами цветового треугольника, а значит, для каждого из этих цветов одна или две координаты отрицательны (рис. 7.4а).

Такой график, на котором расположены все существующие цвета, называется **цветовым графиком**.

Чистые пурпурные цвета расположены на линии, соединяющей красный цвет с длиной волны 700 нм и фиолетовый с длиной волны 400 нм. Таким образом, цветности всех существующих цветов расположены на цветовом графике между кривой линии спектральных цветностей и прямой линией пурпурных цветностей.

Как же пользоваться таким графиком?

Предположим, что мы имеем некоторую поверхность, освещенную неким источником света. Цвет поверхности мы можем рассчитать по распределению энергии в спектре источника и кривой спектрального отражения поверхности. Имея указанные данные, можно рассчитать координаты цветности r , g и b , а по ним уже нанести цвет C_l на цветовой график (рис. 7.3).

Если соединить точку C_l с точкой белого цвета E прямой линией и продолжить её до линии спектральных цветов, на этой линии мы получим цвета, получаемые смешением спектрального цвета λ_l с белым цветом E в различных пропорциях. Все эти цвета будут иметь одинаковый цветовой тон λ_l , но различную степень разбавленности белым цветом. Чем ближе цвет к точке белого цвета, тем меньше его чистота. Для цвета C_l чистота определяется отношением светового потока спектрального цвета к сумме световых потоков спектрального и белого цветов, которые надо смешать, чтобы получить данный цвет.

Из цветового графика видно, что любой не спектральный цвет может быть получен смешением бесчисленного множества пар цветов. Если через точку C_1 провести ряд прямых линий под разным углом, каждая из этих линий пересечет линию спектральных и пурпурных цветов 2 раза, смешение этих цветов в определенной пропорции и даст нам необходимый цвет.

То же относится и к белому цвету, он может быть получен множеством пар цветов, которые, как мы уже знаем, являются взаимно дополнительными цветами. На цветовом графике дополнительные цвета располагаются на прямых линиях, проходящих через точку белого цвета E .

Предположим, что нам нужно рассчитать цвет смеси двух цветов C_1 и C_2 . Для этого нужно знать сумму координат цвета смешиваемых цветов. Расстояние между точками на цветовом графике делится на столько частей, сколько единиц содержится в сумме координат цвета смешиваемых цветов. Затем от точки цвета C_2 откладывается число единиц, содержащихся в сумме координат цвета C_1 . Полученная точка и будет точкой цвета смеси.

Проведение исходных колориметрических опытов связано с большими трудностями. Это объясняется, в частности, тем, что характеристики цветового зрения различных людей не совпадают. Чтобы данные исходных опытов были применимы для большинства людей, необходимо подобрать наблюдателей с нормальным цветовым зрением, а данные, полученные для многих наблюдателей, усреднить. Для получения надежных данных в этих опытах необходима довольно сложная специальная аппаратура. Поэтому исходные колориметрические опыты за всю историю проводились считанное число раз.

В настоящее время мы используем данные, полученные в 1931г. в двух опытах, которые были выполнены Райтом (США) и Гилдом (Англия). Эти опыты проводились с разными основными цветами и на различной аппаратуре для десяти наблюдателей у Райта и семи у Гилда. Но их результаты, пересчитанные на основные цвета RGB, очень хорошо совпали. Поэтому они были приняты в качестве исходных данных для международной системы измерения цветов.

В 1959г. были предложены новые данные по определению удельных координат цвета. Они получены в опытах, проводившихся по новому методу в СССР (Сперанской) и в Англии (Стайлсом и Берчем), и должны обеспечить лучшее соответствие между цветовыми координатами, измеренными непосредственно и вычисленными по спектральным составам. При опытной проверке оказалось, что расхождения в результатах, получаемых с использованием старых и новых данных, малы. Поэтому данные опытов 1931г. снова рекомендованы как основные, а данные опытов 1959г. — как дополнительные к ним.

Цветовая система, построенная на определении заданного цвета через три основных цвета (красного, зеленого и синего), смешанных в определенных пропорциях, дает возможность разрешить все вопросы, связанные с расчетом цвета.

Однако наличие в данной цветовой модели отрицательных координат цветности значительно усложняет цветовые расчеты. Причем, применяя в качестве основных цветов любые другие монохроматические излучения, не удастся избежать отрицательных координат.

Это заставило ученых работать над более совершенной цветовой системой.

7.2. Цветовая система XYZ

В 1931 г. Международная комиссия по освещению утвердила новую колориметрическую систему определения цвета XYZ. Эта система, как и предыдущая, построена на основе трех основных цветов X, Y и Z, являющихся в этой системе единичными.

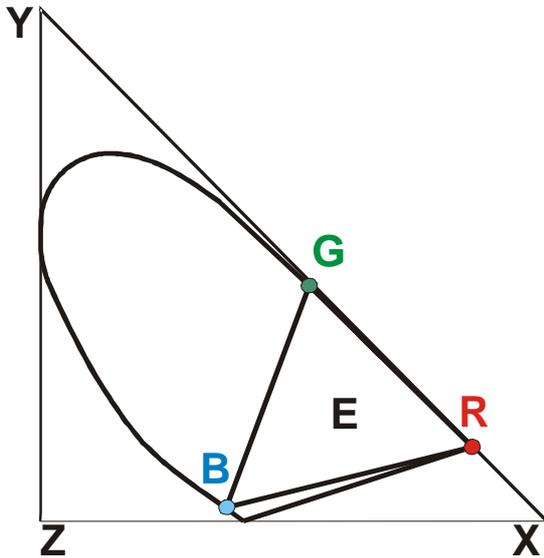


Рис.7.4. Расположение основных цветов XYZ на цветовом графике системы RGB

Цвета X, Y и Z располагаются на цветовом графике системы RGB, как это показано на рис. 7.4. Видно, что вся область существующих цветов располагается внутри прямоугольного треугольника с вершинами цветов X, Y и Z.

Цветовой график в этой системе помещается таким образом, что все координаты цветности для существующих цветов оказываются положительными (рис. 4.7б). Выражение основных цветов X, Y и Z через цвета R, G и B осуществляется путем ряда математических преобразований. Единицам X, Y и Z не следует придавать здесь никакого иного смысла, кроме расчетного.

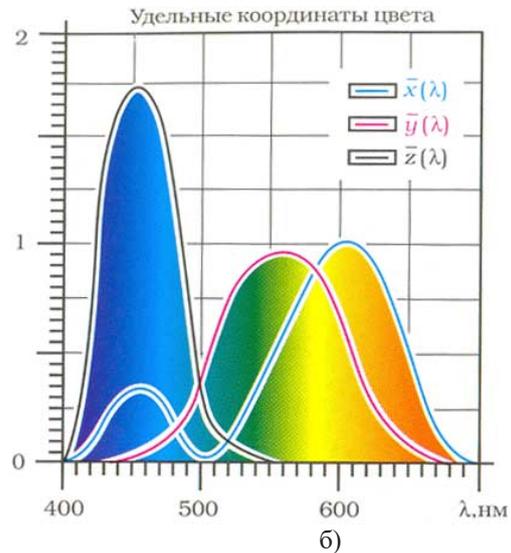
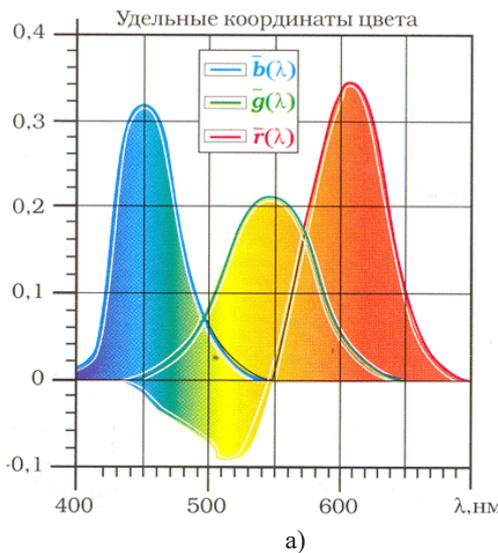


Рис. 7.4. Удельные координаты цвета в системе RGB (а) и в системе XYZ (б)

Любой существующий цвет C выражается в системе XYZ следующим образом:

$$C = x'X + y'Y + z'Z$$

Здесь, как и в системе RGB, x' , y' , z' являются координатами цвета. Координаты цветности x , y и z выражаются через координаты цвета:

$$x = x'/(x'+y'+z'), \quad y = y'/(x'+y'+z'), \quad z = z'/(x'+y'+z')$$

$$x + y + z = 1.$$

На основании значений координат цветности r , g и b были вычислены координаты цветности в колориметрической системе XYZ для всех спектральных цветов [3].

Независимыми, как следует из равенства $x + y + z = 1$, являются только две из трех координат цветности.

Цветовой график в системе XYZ получается на основе откладывания по оси ординат одной из координат цветности, а по оси абсцисс — другой из них для всех спектральных и наиболее чистых пурпурных цветов.

Поскольку $X + Y + Z = 1$, то, зная координаты цветности X и Y , можно получить значение третьей координаты цветности Z путем вычитания из единицы суммы значения координат X и Y . Поэтому в этом графике можно обходиться лишь двумя координатами X и Y , что упрощает расчеты и схему самого графика.

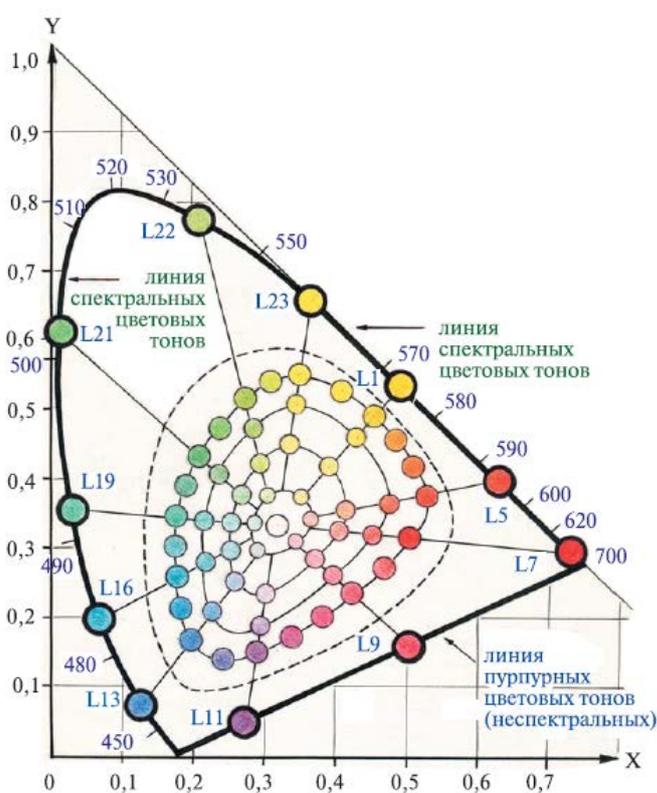


Рис.7.5. Цветовой график МКО

Метод МКО использует в качестве вспомогательного средства график цветностей МКО (рис. 7.5). В середине графика расположен белый цвет E . Вдоль линии спектральных цветов указаны их длины волн в нанометрах. На прямых линиях, соединяющих белый цвет E со спектральными цветами, располагаются цвета, получающиеся смешением спектральных цветов с белым цветом. Для упрощения расчетов цветности на цветовом графике нанесены кривые линии одинаковой чистоты цвета (10, 20,..100%). Последнее значение соответствует спектральным цветам.

Кстати, вдоль линии пурпурных цветов указываются

длины волн цветов, дополнительных к ним, они отмечаются штрихом.

Определив имеющимися методами координаты цвета x' , y' , z' , по ним определяют координаты цветности x , y , z . Откладывая по осям ординат и абсцисс цветового графика значения x и y , находят точку, соответствующую цветности данного цвета. Проведя прямую линию из точки белого цвета E через точку с найденной цветностью до пересечения с линией спектральных цветов, можно определить цветовой тон λ_d , а по кривым одинаковых значений чистоты — чистоту цвета ρ .

Таким образом, цветность любого существующего цвета может быть изображена точкой на цветовом графике и охарактеризована цветовым тоном и чистотой цвета

С помощью графика можно определить, какие цвета получаются при смешении двух и более световых потоков известных цветов. Можно проследить изменение качества цвета (цветового тона и насыщенности) при смешении красок и даже при выцветании красок со временем (как бы их разбеливания) [14].

График МКО также позволяет осуществлять отбор дополнительных друг к другу цветов и может показать пределы высшей чистоты цветов нефлуоресцирующих пигментов и красителей для сравнения с чистотой (насыщенностью) реально доступных красок.

6.3. Колориметры

Мы можем рассчитать цвет, если знаем спектральные коэффициенты отражения поверхности и распределение энергии в спектре источника света, освещающего поверхность. Но обычно, эти данные неизвестны, а снятие этих характеристик трудоемко и требует специальной аппаратуры. Возникает вопрос, может ли быть измерен непосредственно определенный цвет? Да. Приборы для непосредственного измерения цвета существуют и называются **колориметрами** (от лат. color — цвет и греч. metreo — измеряю).

Колориметр трёхцветный — прибор для измерения цвета в одной из трёхмерных колориметрических систем, в которой предполагается, что любой цвет может быть представлен как результат оптического смешения определенных количеств трёх цветов, принимаемых в ней за основные цвета.

Колориметры бывают **визуальные** и **фотоэлектрические**

Визуальные колориметры

Основаны на уравнивании глазом по цвету двух полей сравнения, расположенных рядом. Бывают аддитивными и субтрактивными.

Одно поле аддитивного визуального колориметра освещается измеряемым цветом, а второе – одновременно тремя световыми потоками – красным, зеленым и синим. Изменение цветовых потоков регулируют с помощью заслонок.

Степень закрытия заслонками светофильтров может быть просчитана по шкалам колориметра. Показания шкал прибора при цветовом равенстве обоих полей сравнения позволяют рассчитать координаты цветности измеряемого излучения, пользуясь предварительно сделанной градуировкой.

В субтрактивных визуальных колориметрах цветового равенства двух полей добиваются иным путем. Одно из полей освещается световым потоком, цвет которого необходимо измерить, а другое поле сравнения освещается лампой накаливания, перед которой установлены несколько цветных клиньев с переменной толщиной. При некотором положении цветных клиньев достигается цветовое равенство полей сравнения (рис 7.6).

По шкалам, которые связаны с клиньями, можно высчитать цветовые координаты

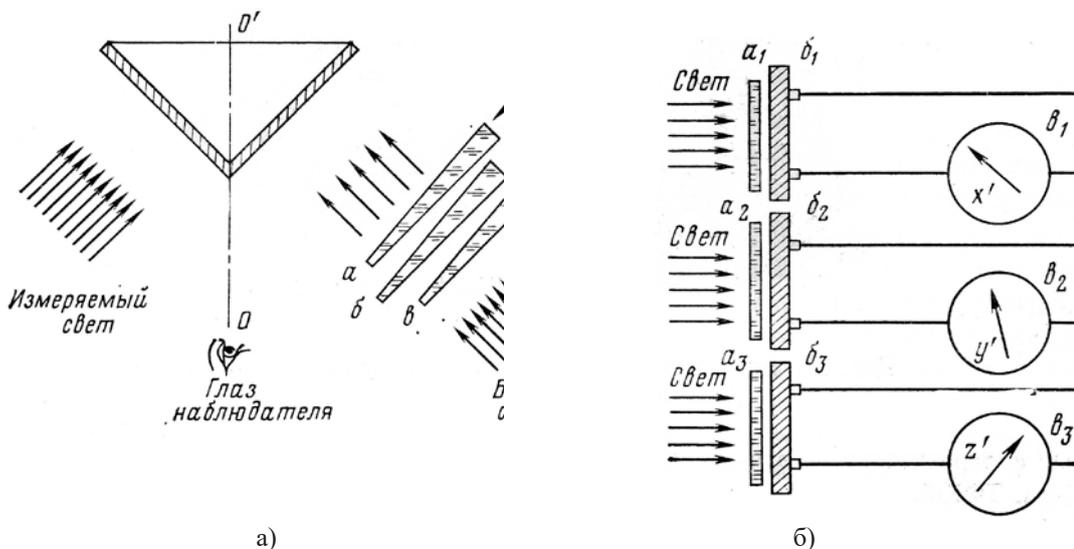


Рис. 7.6. Схема визуального субтрактивного (а) и фотометрического (б) колориметров

Фотоэлектрические колориметры

В фотоэлектрических колориметрах роль глаза выполняют фотоэлементы.

Световой поток, цвет которого требуется измерить, направляется на систему из трех фотоэлементов. Каждый из фотоэлементов соединен с чувствительным гальванометром (рис. 7.6).

При протекании электрического тока в цепи фотоэлемента стрелка гальванометра отклоняется. Перед каждым из фотоэлементов устанавливается специальный корректирующий светофильтр. Кривые спектрального пропускания этих светофильтров подбираются таким образом, чтобы отклонения стрелок гальванометров фотоэлементов были пропорциональны координатам цвета x' , y' , z' .

Фотоэлектрические колориметры подразделяются на спектроколориметры и приборы с селективными приёмниками. В первых измеряемое излучение разлагается дисперсионной призмой (или системой призм) в спектр, «считываемый» фотоэлектрическим приёмником.

В колориметрах с селективными приёмниками используются три приёмника излучения со светофильтрами или один приёмник, перед которым последовательно вводятся три светофильтра.

Фотоэлектрические колориметры различных типов применяются в промышленности для контроля цвета источников света, светофильтров и отражающих материалов и экранов цветных и черно-белых телевизоров. Наиболее точные данные о цвете дают спектроколориметры.

Область цветовых измерений весьма широка. Цветовым измерениям подвергают всевозможные источники света, светофильтры, естественные земные покровы, ткани, архитектурные накраски, некоторые продукты питания, бумажные изделия, керамику и многое другое.