

Министерство связи СССР

Ленинградский электротехнический институт связи
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

С. Б. Враский

ОСНОВЫ КОЛОРИМЕТРИИ

Ленинград 1959

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СВЯЗИ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА

Кафедра телевидения и кафедра физики

С. Б. ВРАСКИЙ

ОСНОВЫ КОЛОРИМЕТРИИ

Учебное пособие по курсу телевидения

Под редакцией П. В. ШМАКОВА

ГОС ПУБЛИЧНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

373 $\frac{8}{60}$

↓

14416

В настоящее время начинает развиваться новая отрасль техники — цветное телевидение. Современные системы цветного телевидения строятся на основе колориметрических расчетов в целях правильного воспроизведения красок передаваемых объектов.

Данный выпуск вводит студентов в сферу основ колориметрии. Изучение изложенного материала облегчит задачу инженерных расчетов в области цветного телевидения.

Проф. П. В. ШМАКОВ

~~B38
59-19
B811~~

ОСНОВЫ КОЛОРИМЕТРИИ

Глава I

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕЛ

Для последовательного и плодотворного описания цветного видения нужно научиться количественно описывать:

1) внешнюю причину, вызвавшую цветное ощущение, т. е. устанавливаемое физическими методами *излучение*, действующее на глаз (*раздражитель*) и

2) результат раздражения — *восприятие* света. Полное описание явлений в этой области дается колориметрией, физиологической оптикой и специальными психологическими исследованиями цветного восприятия.

В настоящих лекциях мы ограничиваемся исключительно вопросами колориметрии и только для указания пределов используемых излучений по длине волны и интенсивности пользуемся данными физиологической оптики.

Для сохранения законченности изложения в этой главе дается более последовательное, чем в общем курсе физики, математическое описание спектрального состава излучения и фотометрических свойств тел. Это описание дано в объеме, достаточном для понимания дальнейшего изложения.

Лучистый поток F , т. е. поток электромагнитных волн (измеряется в ваттах), может иметь различный характер спектрального состава: спектр может быть линейчатый (в частном случае будем иметь поток монохроматического излучения F_λ), сплошной или, наконец, смешанный, в частности, полосатый. Сейчас мы будем говорить о непрерывных спектрах.

Спектральная характеристика лучистого потока дается так называемой спектральной интенсивностью лучистого потока φ_λ , являющейся коэффициентом пропорциональности между малым потоком dF и $d\lambda$ — величиной малого интервала длин волн (от λ до $\lambda + d\lambda$), содержащим этот малый поток:

$$dF = \varphi_\lambda d\lambda. \quad (1)$$

Для примера на рис. I приведена спектральная интенсивность

источника белого света типа *C*. На этом рисунке заштрихованный столбик, заключенный между абсциссами λ и $\lambda + d\lambda$ и имеющий высоту φ_λ , и дает значение dF , соответствующее данному λ . Вся площадь эпюры, т. е.

$$\int_0^\infty \varphi_\lambda \cdot d\lambda = F, \quad (2)$$

дает всю величину лучистого потока.

Из сказанного ясно, что размерность спектральной интенсивности будет

$$|\varphi_\lambda| = \left| \frac{F}{\lambda} \right| = \frac{\text{вт}}{\text{м}\mu} \text{ или } \frac{\text{вт}}{\lambda}.$$

Естественно, что спектральная интенсивность может выражаться не только в функции длины волны, но и в функции частоты ν . Такого рода описание совершенно равноправно с только что данным и, хотя мы и не будем им пользоваться в дальнейшем, нам следует здесь сделать одно замечание во избежание каких-либо недоразумений. Спектральная интенсивность φ_ν является коэффициентом пропорциональности между малым лучистым потоком dF и малым интервалом частот (заключенным между ν и $\nu + d\nu$), т. е.

$$dF = \varphi_\nu \cdot d\nu. \quad (3)$$

Размерность $|\varphi_\nu| = \left| \frac{F}{\nu} \right| = \frac{\text{ватт}}{\text{герц}}$, т. е. *ватт-сек.*

Можно было бы начертить график, аналогичный изображенному на рис. 1, отложив только на оси ординат φ_ν вместо φ_λ , а на оси абсцисс частоту ν вместо длины волны λ . При этом характер кривой (не только геометрический, но и физический) претерпел бы радикальное изменение. Так, максимум спектральной интенсивности, при-

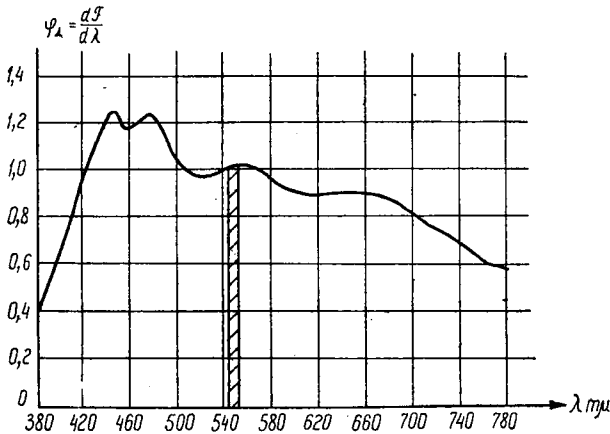


Рис. 1. Спектральная интенсивность источника белого света типа *C*.

ходящийся на рис. 1 на длину волны $\lambda = 460$ миллимикрон, не придется теперь на частоту

$$\nu = \frac{C}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{460 \cdot 10^{-7}} = 6,5 \cdot 10^{14} \text{ сек}^{-1},$$

а на какую-то совершенно другую частоту. Новая функция φ , получается из φ_λ пересчетом $dF = \varphi_\nu \cdot d\nu = \varphi_\lambda \cdot d\lambda$,

$$\varphi_\nu = \varphi_\lambda \frac{d\lambda}{d\nu} = -\frac{C}{\nu^2} \varphi_\lambda = -\frac{\lambda^2}{C} \varphi_\lambda. \quad (4)$$

Самым убедительным примером распространенного недоразумения с пересчетами такого типа является утверждение, что, поскольку максимум спектральной интенсивности в излучении Солнца лежит близ волны 550 миллимикрон, максимум спектральной интенсивности φ_ν излучения Солнца по частоте ν лежит близ частоты

$$\nu = \frac{C}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{550 \cdot 10^{-7}} \cong 5,5 \cdot 10^{14} \text{ герц}.$$

На самом деле максимум φ_ν в этом случае лежит близ частоты $2,94 \cdot 10^{14}$ герц, что соответствует $\lambda = 1,02 \mu$, т. е. инфракрасной области.

Недоразумение заключается в том, что никто не может сказать, что в сплошном спектре на какую-то длину волны приходится какая-то мощность. Можно говорить лишь (и это и будет спектральная интенсивность по длине волны), сколько мощности приходится на участок спектра в один ангстрем (миллимикрон, микрон). Если же используют спектральную интенсивность по частоте, то тем самым описывают спектральный состав излучения мощностью, приходящейся на участок спектра в один герц (но не мощностью, приходящейся на данную частоту). Разумеется, место спектра, где приходится больше всего мощности на один ангстрем (максимум φ_λ), и место, где приходится больше всего мощности на один герц (максимум φ_ν), вовсе не совпадают между собой.

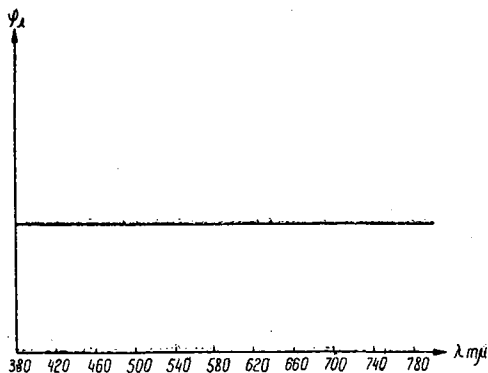


Рис. 2. Спектральная интенсивность источника E по длине волн.

В качестве второго примера полезно привести равноинтенсивное (по длине волны) излучение. На рис. 2 изображен спектр так назы-

ваемого равноинтенсивного излучения. Здесь φ_λ является постоянной величиной. На рис. 3 изображена спектральная интенсивность по

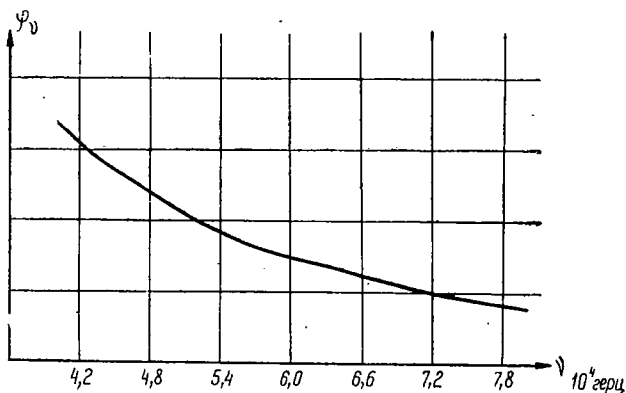


Рис. 3. Спектральная интенсивность источника E по частоте. частоте для этого же излучения. Здесь спектральная интенсивность φ_ν падает, как квадрат частоты, и излучение не является равноинтенсивным по частоте.

Иначе обстоит дело с коэффициентами, характеризующими фотометрические свойства тел: спектральными коэффициентами отражения и поглощения. Эти *безразмерные* коэффициенты строго характеризуются именно при помощи монохроматических излучений. Так, спектральный коэффициент отражения ρ_λ определяется как отношение отраженного монохроматического потока излучения к падающему монохроматическому потоку

$$\rho_\lambda = \frac{F_{\rho\lambda}}{F_\lambda} \quad (5)$$

На рис. 4 графически изображен коэффициент отражения какого-то тела как функция длины волны λ . Получить спектральный коэффициент отражения ρ_ν этого тела как функцию частоты ν можно, заменяя в выражении $\rho_\lambda = f(\lambda)$ длину волны λ через частоту просто по формуле $\nu = \frac{C}{\lambda}$. Если мы имеем так называемое серое тело, т. е. тело, коэффициент отражения которого ρ_λ не зависит от длины волны λ (одинаков для всех длин волн), то и коэффициент отражения ρ_ν будет одинаков для всех частот.

Спектральный состав излучения, попадающего к нам в глаз или в объектив телевизионной камеры после рассеяния от объекта, отличается от спектрального состава излучения, падающего на объект. Если поток излучения, падающий на объект, может быть записан как

$$F = \int_0^{\infty} \varphi_\lambda \cdot d\lambda, \quad (6)$$

то рассеянный поток запишется так (см. рис. 5):

$$F_{\rho} = \int_0^{\infty} \rho_{\lambda} \cdot \varphi_{\lambda} \cdot d\lambda. \quad (7)$$

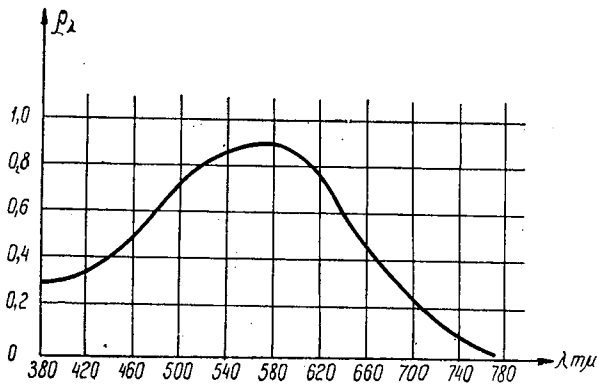


Рис. 4. Коэффициент отражения в зависимости от длины волны.

Аналогичные изменения претерпевает спектральный состав излучения при прохождении через вещество. В этом случае вместо спектрального коэффициента отражения ρ_{λ} надо пользоваться спектральным коэффициентом пропускания τ_{λ} . Следует заметить, что, хотя мы и говорили о коэффициенте отражения, мы не будем принимать во внимание явление регулярного отражения под углом отражения, равным углу падения. Идеально отражающих тел мы не видим (например, в идеальном зеркале мы видим себя и источники света, но не видим самого зеркала), а видим мы только тела, испускающие свет и *рассеивающие* чужой свет. Выше мы имели в виду не френелевский коэффициент отражения (с точностью до дисперсии, не зависящий от длины волны), а коэффициент рассеяния света, зависящий от фотометрических свойств тела.

Зрительное раздражение, получаемое при рассматривании тела, зависит от освещенности сетчатки глаза, а последняя зависит от яркости объекта. Яркость тела будет в дальнейшем изложении играть поэтому большую роль. Разумеется, для зрительного впечатления важна не полная яркость излучения, а яркость светового потока, т. е. яркость излучения, пересчитанная с учетом свойств человеческого глаза. Подробнее об этом будет сказано в следующей главе, сейчас укажем только, что для яркости излучения образуются также функции распределения интенсивности, как и для потока излучения. Спектральная плотность яркости ψ_{λ} является коэффициентом пропорциональности между малым потоком излучения, излучаемым

с одного видимого квадратного сантиметра в единицу телесного угла Ω в данном направлении, и малым интервалом длин волн

$$dF_{S\Omega} = \psi_{\lambda} d\lambda. \quad (8)$$

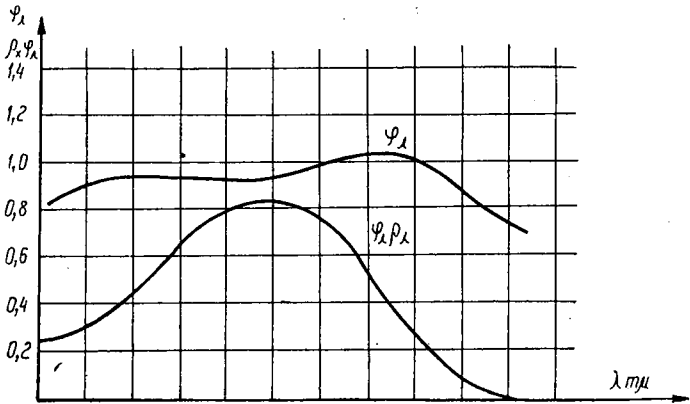


Рис. 5. Спектральная интенсивность рассеянного потока.

Интегральная яркость излучения получится как сумма всех элементарных яркостей

$$F_{S\Omega} = \int_0^{\infty} \psi_{\lambda} \cdot d\lambda \cdot \frac{6m}{\text{см}^2 \text{ср}}, \quad (9)$$

ψ_{λ} имеет размерность $\frac{6m}{\text{см}^2 \text{м}\mu \text{ср}}$.

Однако видимая яркость может быть подсчитана только с учетом спектральной чувствительности человеческого глаза v_{λ} (см. следующую главу) и оказывается пропорциональной

$$B \approx \int_0^{\infty} v_{\lambda} \cdot \psi_{\lambda} \cdot d\lambda. \quad (10)$$

Ниже, в главе шестой, мы воспользуемся (10) для расчета яркости поверхности.

Глава II

СВОЙСТВА ГЛАЗА

Человеческий глаз представляет собой селективный приемник излучения. Рис. 6 дает величину впечатления светового раздражения в зависимости от длины волны излучения, одинаковой мощности на

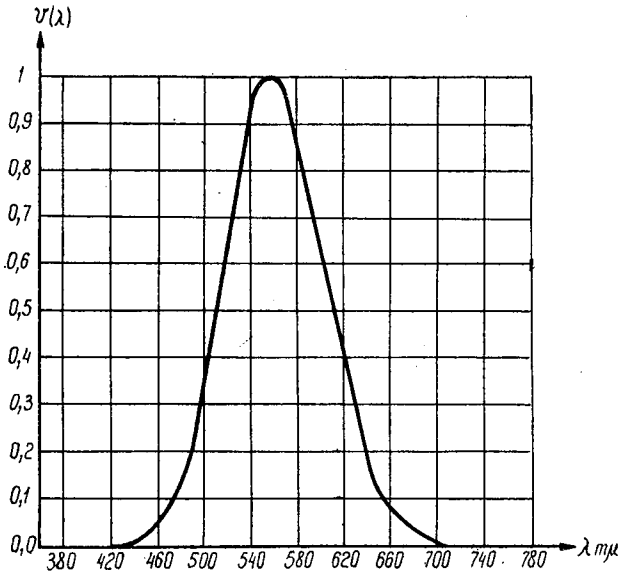


Рис. 6. Кривая видности.

всех длинах волн. Кривая рис. 6 называется «кривой видности». В таблице 1 приложения дана спектральная чувствительность среднего глаза или «видность» v_λ . Наибольшего значения v_λ достигает для $\lambda = 555$ мкм. Здесь она была условно принята равной единице.

Таблица 1 (см. приложение) дает значения спектральной чувствительности глаза в пределах от 380 до 770 мкм и хотя из нее видно, что спектральная чувствительность глаза при этих длинах волн не стала равна нулю, она достигла столь малых значений (соответствен-

но 4 и 3 сотысячных), что эти длины волн считаются коротковолновым и длинноволновым пределами видимого излучения, т. е. света. В дальнейшем условимся светом называть электромагнитное излучение, оцененное глазом по тому действию, которое оно на него производит.

Если речь будет идти об энергетической оценке электромагнитных волн, то мы будем говорить об энергии излучения и лучистом потоке F в ваттах (как это и делалось в первой главе). Если мы будем говорить о световом потоке Φ (для монохроматического потока Φ_λ), оцениваемом числом люменов, то световой поток оценивается глазом по тому впечатлению, которое оно на него производит. Связь светового потока с потоком излучения дается для $\lambda = 0,555 \mu$.

Поток излучения мощностью в один ватт при этой длине волны соответствует световому потоку в 621 люмен. Для всякого другого монохроматического потока излучения имеем поэтому

$$\Phi_\lambda = 621 \cdot v_\lambda \cdot F_\lambda \text{ люменов,} \quad (11)$$

где v_λ — видность, спектральная чувствительность глаза. Световой поток в случае полихроматического излучения является суммой малых световых потоков, соответствующих малым квазимонохроматическим потокам излучения

$$\Phi = \int_{380}^{770} d\Phi_\lambda = 621 \int_{380}^{770} v_\lambda dF_\lambda = 621 \int_{380}^{770} v_\lambda \cdot \varphi_\lambda \cdot d\lambda. \quad (12)$$

Пределы интегрирования выбраны в соответствии со сказанным выше. Излучение, длины волн которого лежат за этими пределами, не вызывает зрительного раздражения в глазу. В диапазоне длин волн от 10 до 380 мμ электромагнитные волны называются ультрафиолетовым излучением, а в диапазоне от 0,77 μ до 340 μ — инфракрасным излучением. Электромагнитное излучение с длинами волн от 10 мμ до 340 μ, т. е. включающее ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучения, называется оптическим излучением, так как оптика занимается не только видимым светом, но также и соседними областями спектра.

Зрительное впечатление, вызываемое одинаковыми по величине световыми потоками Φ_λ , различающимися длиной волны, будет неодинаково. Говорят, что зрительное впечатление от одного и от другого такого светового потока хотя и одинаково по яркости, но отличается **ЦВЕТНОСТЬЮ**. Здесь мы впервые встречаемся со свойством, количественному описанию которого в дальнейшем придется уделить много внимания.

Цветоразличительные свойства глаза проявляются, начиная с некоторой минимальной яркости объекта, когда вступают в работу светочувствительные элементы глаза, называемые колбочками. Опытom

установлено, что для колориметрических исследований яркость полей сравнения не должна быть меньше 0,001 стильба, при меньшей яркости работает другой, палочковый, аппарат глаза, более чувствительный, чем колбочковый, однако лишенный цветоразличительных возможностей. Палочковый аппарат, при помощи которого осуществляется так называемое сумеречное, цветнослепое зрение, позволяет устанавливать только яркостный контраст. При яркости более 0,001 стильба палочковый аппарат ослеплен (и тем самым исключен), и глаз констатирует не только яркостный, но и цветовой контраст. Так, если одна половина поля сравнения голубая, а другая — розовая, то никакими изменениями яркости нельзя их уравнять для цветочувствительного глаза. При этом может возникнуть вопрос: можно ли говорить о равной визуальной яркости двух тел различной цветности? На этот вопрос приходится дать положительный ответ. Несомненно, что можно сделать одно, предположим, красное поле сравнения заметно ярче другого, предположим, зеленого. Изменяя яркости полей сравнения, можно получить и обратное положение, когда зеленое ярче красного. Таким образом, сравнение яркостей полей различной цветности возможно. Вопрос заключается лишь в том, с какой точностью может быть установлена равная визуальная яркость двух таких полей. Очевидно, что чем ближе цветность этих полей, тем легче и точнее производится на глаз их яркостное сравнение. Опыт показывает, что яркость полей сравнения не должна превышать одного стильба. При большей яркости начинается ослепление колбочкового аппарата глаза.

При соблюдении указанных условий в отношении яркости: на опыте установлено, что определенный спектральный состав излучения соответствует определенной цветности света (но ни в каком случае не наоборот!). Так, например, опытом установлено, что монохроматическое излучение с длиной волны, заключенной в некотором диапазоне, вызывает ощущение цветности в соответствии с данными таблицы 2 приложения.

Еще Ньютон установил следующие три факта, относящиеся к цвету:

1. Любое спектральное распределение по длинам волн вызывает ощущение, которое наблюдатель связывает с некоторым цветом. (Выше мы уже оговорили ограничения, так что теперь вряд ли можно строго сказать «любое» распределение. Длины волн не должны быть больше 0,77 и меньше 0,38 μ . Яркость не должна быть больше 1 и меньше 0,001 стильба).

2. Ощущение одного и того же цвета может быть вызвано светом различного спектрального состава.

3. Цвет объектов определяется как составом излучения источника света, так и селективным отражением или пропусканием объекта.

На языке объективной оптики это положение было бы сформулировано так: спектральный состав излучения, рассеиваемого телом, зависит как от фотометрических свойств тела, так и от спектраль-

ного состава излучения, падающего на тело. Об этом говорит нам формула (7).

В отличие от таких характеристик излучения как длина волны, энергия кванта и т. д., являющихся объективными характеристиками излучения, цвет и цветность характеризуют эффект взаимодействия излучения и глаза и преломления этого взаимодействия в человеческой психике.

Глава III

ЦВЕТОВЫЕ УРАВНЕНИЯ

Долгое время в вопросах смешения цветов не было необходимой ясности. Главным образом недоразумения происходили из-за того, что смешение красок не разграничивалось от смешения световых потоков. Поясним это.

Если источник белого света поместить за желтым стеклом, пропускающим зеленый, желтый и красный цвета, и таким цветом (обедненным синим, голубым и фиолетовым) освещать синий предмет, заметно рассеивающий синий и зеленый цвета, но нацело поглощающий желтый и красный, то в результате свет, рассеянный предметом, будет наблюдателю казаться зеленым, так как это единственный из цветов, рассеиваемых предметом, присутствующий в падающем на него свете. Можно было бы сказать, что фильтр «вычел» из белого света синий, голубой и фиолетовый, а рассеивающий предмет — «вычел» красный и желтый. Остался, таким образом, один зеленый. Способ цветовоспроизведения, основанный на вычитании цветов, называется *субтрактивным*. В наиболее чистом виде он нашел применение в цветной фотографии и в качестве существенного (но не единственного) фактора — в цветной печати. С вычитанием цветов мы всегда имеем дело, если заставляем свет последовательно проходить через несколько фильтров. Вычитание имеет место также при смешении красок на бумаге.

Совсем другой результат получается при смешении световых потоков различной цветности. Пусть на белый экран падает свет от двух проекторов сразу. Свет одного из них прошел через желтый фильтр, свет другого — через синий. Наблюдателю при этом экран представится почти что белым. Отметим, что два цвета, дающие при смешении белый, называются *дополнительными цветами*. В описанном способе имело место сложение потоков, и сам метод цветовоспроизведения, основанный на таком процессе, называется поэтому *аддитивным методом*. Во всем дальнейшем изложении мы будем говорить только об этом аддитивном способе цветовоспроизведения, так как только этим методом может быть создано цветное изображение в телевизионном приемнике.

Колориметрия — наука об измерении цвета — покоится на опытном материале, касающемся цветового восприятия человека. Рациональная теория цветового зрения складывалась на протяжении почти полутора веков. М. В. Ломоносов (1756) в своем трактате «Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее» впервые развил идеи трехкомпонентной теории зрения. Томас Юнг (1802) выступил с теорией трехкомпонентности физиологического аппарата зрения в «Лекции о теории света и цвета». Во второй половине XIX века эта теория была развита Гельмгольцем и Максвеллом. Эта теория покоится на том фундаментальном опытном факте, что смешением трех монохроматических (спектральных) цветов можно получить почти все возможные цвета. Гистологически до сих пор не удалось установить три рода цветковых приемников в глазу человека. То обстоятельство, что при помощи смешения трех спектральных цветов нельзя получить абсолютно все, а только почти все цвета, не является существенным недостатком для телевидения.

В телевидении три цвета воспроизводятся при помощи трех фосфоров в приемной трубке, а изменением сигналов, подаваемых на трубку, меняется интенсивность свечения этих фосфоров, и смесь этих трех свечений (одновременных или последовательных) производит почти все (а практически — все) нужные цветовые ощущения.

Все современные системы цветного телевидения строятся на основании колориметрических расчетов. Основной задачей этих лекций и является сообщение сведений из колориметрии в объеме, необходимом для проведения таких расчетов.

Сформулируем следующие основные правила колориметрии.

1. Любой цвет может быть подобран смесью не более чем трех взаимно независимых (см. ниже) цветов.

2. Подбор цветности, сделанный при одной интенсивности излучения, сохраняется при изменении интенсивности в широких пределах.

3. Компоненты смеси цветных лучей не могут быть определены глазом.

4. Яркость смеси (визуальная) равна сумме яркостей ее компонентов.

5. Непрерывному изменению излучения соответствует также непрерывное изменение цвета.

6. Цвет смеси зависит только от цветов смешиваемых компонентов и не определяет однозначно спектрального состава излучения.

7. Если цвет *A* производит то же впечатление, что и цвет *B*, и если цвет *Г* производит то же впечатление, что и цвет *Д*, то смесь цветов *A* и *Г* производит то же впечатление, что и смесь цветов *B* и *Д*. Надо помнить при этом, что спектральный состав цветов *A* и *B* был вовсе не одинаков, а только впечатление на глаз было одинаковым. То же относится и к цветам *Г* и *Д*. Таким образом, смесь цветов *A* и *Г* имеет иной спектральный состав, чем смесь цветов *B* и *Д*, и все же заранее

можно утверждать, что по визуальному впечатлению $A+Г$ будет равно $B+Д$.

8. Если смесь одного и того же цвета A один раз с цветом B , а другой раз с цветом $Г$ приводит к одному и тому же цвету, то и цвет B равен цвету $Г$ (о спектральных составах этих излучений мы по-прежнему ничего сказать не можем).

9. Подбор цвета может быть выражен в форме цветового уравнения. Например, утверждение, что a' единиц цвета A производят такое же впечатление, как и аддитивная смесь b' единиц цвета B , c' единиц цвета C и d' единиц цвета D может быть записано в форме

$$a'A = b'B + c'C + d'D. \quad (13)$$

Такого рода запись, где «=» означает: «производит то же впечатление», а знак «+» означает: «аддитивно смешанный с», — является лаконичной записью наших ощущений.

В уравнении (13) большими буквами обозначены «единичные цвета» (о выборе этих единиц будет сказано ниже), а маленькими буквами — множители, указывающие, в каких количествах смешиваются излучения, соответствующие цветам B , C и D . То же относится и к левой части, где буквой « A » мы обозначаем единичный цвет, цветность которого совпадает с цветностью смеси, описанной правой частью, а множитель a' приводит к выравниванию яркостей обеих частей. С этой точки зрения уравнение (13) является записью 4-го правила, сформулированного нами выше: «Визуальная яркость смеси равна сумме яркостей компонентов». Напомним, что, согласно уже сказанному выше, если глаз видит некоторый контраст, то это всегда означает, что вызывающие его излучения различны. Однако если глаз не видит контраста, т. е. не видит различия в цвете, то это еще не значит, что вызывающие их излучения одинаковы.

Если поля сравнения таковы, что изменением яркости одного из полей можно придти к полному исчезновению контраста, это значит, что имел место только яркостный контраст, а цветность обрх полей сравнения одинакова.

В случае качественного (а не количественного, яркостного) контраста поля отличаются между собой по цветности. Соотношение мощности их излучения ничего не говорит о яркостном соотношении цветов.

Таким образом, цветность представляет собой характеристику цвета, определяющую качественную сторону цвета, независимую от яркости.

Цветовые уравнения, в частности уравнения типа (13), утверждают равенство и яркости и цветности полей сравнения. Такой смысл эти уравнения имеют только применительно к человеческому глазу, так как он является единственным приемником, обладающим цветоразличительными свойствами.

Если бы приемник света обладал спектральной чувствительностью, совпадающей с кривой видности v_{λ} человеческого глаза,

то цветовые уравнения сохранили бы для него справедливость в отношении равной яркости полей сравнения. О цветности полей сравнения никакой приемник, кроме глаза, судить не может.

Для приемника, кривая спектральной чувствительности которого не совпадает с кривой видности человеческого глаза, цветовые уравнения теряют всякий смысл.

Для того, чтобы нагляднее изложить законы смешения цветов, представим себе устройство (схематически это и будет визуальный колориметр), состоящее из гипсовой призмы, на одну из граней которой посылает излучение исследуемый источник, а на другую грань — три источника: красный R , зеленый G и синий B .

Зрительная труба, при помощи которой ведутся наблюдения, направлена на ребро призмы, разделяющее освещенные грани. Следовательно, поле зрения трубы разделено на два поля сравнения: одно, — освещаемое исследуемым цветом, другое, — освещаемое смесью цветов трех источников. Описываемая схема цветового измерения лежит в основе всей колориметрии. Человек весьма неточно описывает разность цветов, но очень хорошо устанавливает тождество цветов полей сравнения. Поэтому в колориметрии низшей метрики цветов глаз играет роль нулевого прибора, устанавливающего отсутствие контраста двух полей сравнения. Развитие (еще не законченное) колориметрии высшей метрики цвета, строящейся на минимальных различимых разностях цветности, должно в дальнейшем помочь расчетам художественного восприятия цветного изображения. В этих лекциях мы говорим всегда только об установке полей сравнения на тождество. Три цвета, освещающие одно из полей сравнения, могут быть какими угодно, но должны быть *линейно независимыми*. Это значит, что смесью любых количеств двух из этих цветов нельзя получить третий, т. е. имеет место утверждение

$$r'R \neq g'G + b'B. \quad (14)$$

Между каждым из трех источников R , G , B и призмой стоит устройство, ослабляющее поток излучения данного источника в определенное число раз. При этом в процессе работы колориметрист имеет дело именно с этими ослабителями и, меняя поток излучения, подаваемый на грань призмы от того или иного источника, добивается уравнения цвета (т. е. цветности и яркости) полей сравнения.

Пусть на левую грань нашей призмы падает свет цветности N , имеющий цвет $n'N$, т. е. количество единиц его (или, как мы будем говорить далее, — «модуль») равно n' . На правую грань при этом через ослабители падает излучение от трех источников R , G , и B . Подбрав при помощи ослабителей надлежащие модули r' , g' , b' , добиваемся равенства цвета обеих граней. Тогда мы можем написать цветовое уравнение

$$n'N = r'R + g'G + b'B \quad (15)$$

Выше мы уже отмечали, что почти все цвета спектра могут быть получены смесью трех (линейно независимых) цветов. Таким образом, равенство (15) почти всегда может быть осуществлено смесью красного, зеленого и синего цветов. Если же мы пойдем на некоторое расширение понимания этого уравнения, то оно всегда (без исключений) может быть написано. Это расширение заключается в том, что для некоторых цветов, которые не удастся получить смесью этих трех, называемых «первичными», можно один из цветов перенести на сторону исследуемого цвета. Пусть мы перенесли красную составляющую и теперь добились цветового равновесия колориметра. Тогда мы можем написать

$$n'N + r'R = g'G + b'B. \quad (16)$$

Перенос в (16) красный цвет в правую часть уравнения, имеем

$$n'N = g'G + b'B - r'R. \quad (17)$$

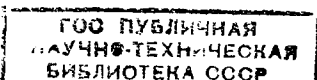
Таким образом, (16) можно прочесть так: испытуемый цвет $n'N$ в сумме с r' единиц красного дает такое же впечатление, как смесь g' единиц зеленого и b' единиц синего, а уравнение (17) можно прочесть так: n' единиц испытуемого цвета дает такое же впечатление, как смесь g' единиц зеленого и b' единиц синего, от которой отнято r' единиц красного.

Таким образом, мы обобщили нашу колориметрическую алгебру на случай отрицательных единиц r' , g' , b' . В этом обобщенном смысле уравнение (15) справедливо всегда, т. е. нет такого цвета, который нельзя было бы подобрать смесью трех линейно независимых цветов, если в понятие «смесь» входит не только сложение, но и вычитание цветов. Этим самым мы пришли к первому закону смешения, который утверждает, что *любые четыре цвета находятся в линейной зависимости, хотя существует неограниченное число линейно независимых совокупностей из трех цветов.*

Другими словами, любой цвет может быть представлен в форме (15), причем единичные цвета R , G , B являются постоянными, а тремя переменными являются модули r' , g' и b' .

Напомним, что мы не выбрали еще единиц для количественного описания цветов.

Первым шагом является выбор первичных цветов. Пусть выбраны цвета: красный — 700,0 миллимикрон, зеленый — 546,1 миллимикрон и синий 435,8 миллимикрон. Эти цвета были приняты в колориметрии за стандарт. Вторым шагом является выбор так называемого «опорного» цвета. Из дальнейшего будет понятно, что такое опорный цвет. Пусть за опорный цвет взято равноинтенсивное по длине волн излучение. Спектр такого излучения изображен на рис. 2. Глазу такое излучение представляется белым или слегка синеватым. Мы будем называть его в дальнейшем «белым равноинтенсивным». Разумеется, сейчас мы говорим о цветности. Чтобы все сказать о цвете, надо еще указать на его интенсивность. Покамест мы от этого воздержимся.



373 $\frac{8}{60}$

Пусть равноинтенсивный белый освещает левое поле сравнения колориметра, а правое поле освещается тремя первичными R , G и B . Манипулируя ослабителями, колориметрист приведет оба поля сравнения к равенству. При этом пропускание ослабителей мы соответственно обозначим через s_r , s_g и s_b . Если теперь белый равноинтенсивный будет заменен каким-то другим, исследуемым цветом, для получения равновесия колориметра придется переменить положения ослабителей. Новые положения ослабителей дадут теперь s'_r , s'_g и s'_b .

Мы получаем теперь возможность количественно определить каждый из первичных цветов, взятых для получения исследуемого цвета, как отношение положения данного ослабителя при уравнивании исследуемого цвета к положению при уравнивании опорного цвета. Этими количественными характеристиками и будут отношения s' к s :

$$r' = \frac{s'_r}{s_r}; \quad g' = \frac{s'_g}{s_g}; \quad b' = \frac{s'_b}{s_b}. \quad (18)$$

Таким образом, нами получены известные нам уже модули r' , g' и b' , называемые по предложению комитета технической терминологии АН СССР *цветовыми коэффициентами* или *цветовыми компонентами*. Абсолютные величины этих коэффициентов зависят как от опорного цвета, так и от исследуемого цвета, тогда как соотношение их зависит только от цветностей опорного и исследуемого цветов (и не зависит от их яркостей). Это положение станет еще отчетливее, если от цветовых коэффициентов единичных первичных цветов мы перейдем к так называемым *относительным цветовым коэффициентам*.

Назовем сумму цветных модулей, характеризующих данный цвет, «цветовым модулем» этого цвета. Так, в нашем случае (уравнение (15)) цветовым модулем будет сумма

$$m = r' + g' + b'. \quad (19)$$

Введем теперь *трехцветные коэффициенты* (*относительные цветовые коэффициенты*) как отношение модуля данного первичного цвета к цветовому модулю описываемого цвета. Получим:

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{r'}{m} = \frac{r'}{r' + g' + b'} \\ g &= \frac{g'}{m} = \frac{g'}{r' + g' + b'} \\ b &= \frac{b'}{m} = \frac{b'}{r' + g' + b'} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Ясно, что сумма трехцветных коэффициентов всегда равна единице

$$r + g + b \equiv \frac{r' + g' + b'}{r' + g' + b'} \equiv 1. \quad (21)$$

Выбор единичного цвета N делается таким образом, чтобы сумма модулей первичных цветов m равнялась бы единице. При таком условии ($n' = 1$, так как цвет единичный)

$$n' = m = 1 \quad (22)$$

и (15) превращается в

$$N = rR + gG + bB. \quad (23)$$

Таким образом, *единичным* мы будем называть цвет, сумма цветовых модулей которого равна единице, т. е. $r' + g' + b' = 1$.

Для единичного цвета поэтому цветовые компоненты r' , g' и b' равны соответственно относительным цветовым коэффициентам r , g и b .

При одновременном и пропорциональном изменении всех трех коэффициентов r' , g' и b' относительные коэффициенты не изменяются, как не меняется и цветность света. При изменении же соотношения коэффициентов первичных цветов меняются и относительные коэффициенты и цветность света. Таким образом, относительные коэффициенты не определяют полностью цвет света, а только его цветность. Яркость не находит в них никакого отражения.

ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ЦВЕТА

В предыдущей главе мы ввели очень важное понятие: относительные коэффициенты. Опорный цвет в функции этих коэффициентов характеризуется тем, что эти коэффициенты равны между собой и каждый из них равен одной трети:

$$r = g = b = \frac{1}{3}.$$

Первичный красный характеризуется значениями

$$r = 1, g = 0, b = 0 \text{ или } (1, 0, 0).$$

Подобно этому другие два первичных цвета характеризуются значениями $(0, 1, 0)$ и $(0, 0, 1)$.

Итак, нами теперь выяснена роль и значение опорного цвета: цветовые модули первичных цветов для образования опорного равны между собой и принимаются равными единице, а относительные коэффициенты тоже равны между собой и так как в сумме они должны равняться единице, то каждый из них равен одной трети. При этом следует иметь в виду, что ни мощность излучения первичных источников, ни яркость (видимая) их отнюдь не равны между собой. За единицу приняты такие значения их яркостей, которые при смешении дают опорный цвет. Разумеется, не задав яркости опорного цвета, ничего нельзя сказать об абсолютном значении яркостей каждого из первичных единичных цветов (за исключением того, что сумма их яркостей должна равняться яркости опорного цвета), и поэтому модули r' , g' и b' представляют гораздо меньший интерес, чем относительные коэффициенты. Как бы ни изменялась яркость опорного цвета, относительные цветовые коэффициенты для данной цветности остаются неизменными, тогда как модули должны меняться в соответствии с яркостью опорного цвета.

Опытом установлено, что отношение яркостей первичных цветов, дающих при наложении цвет опорного белого, должно быть

$$L_r : L_g : L_b = 1 : 4,5907 : 0,0601. \quad (24)$$

Чрезвычайно большое принципиальное и практическое значение имеет установление относительных коэффициентов для цветностей чистых спектральных цветов (т. е. монохроматических излучений).

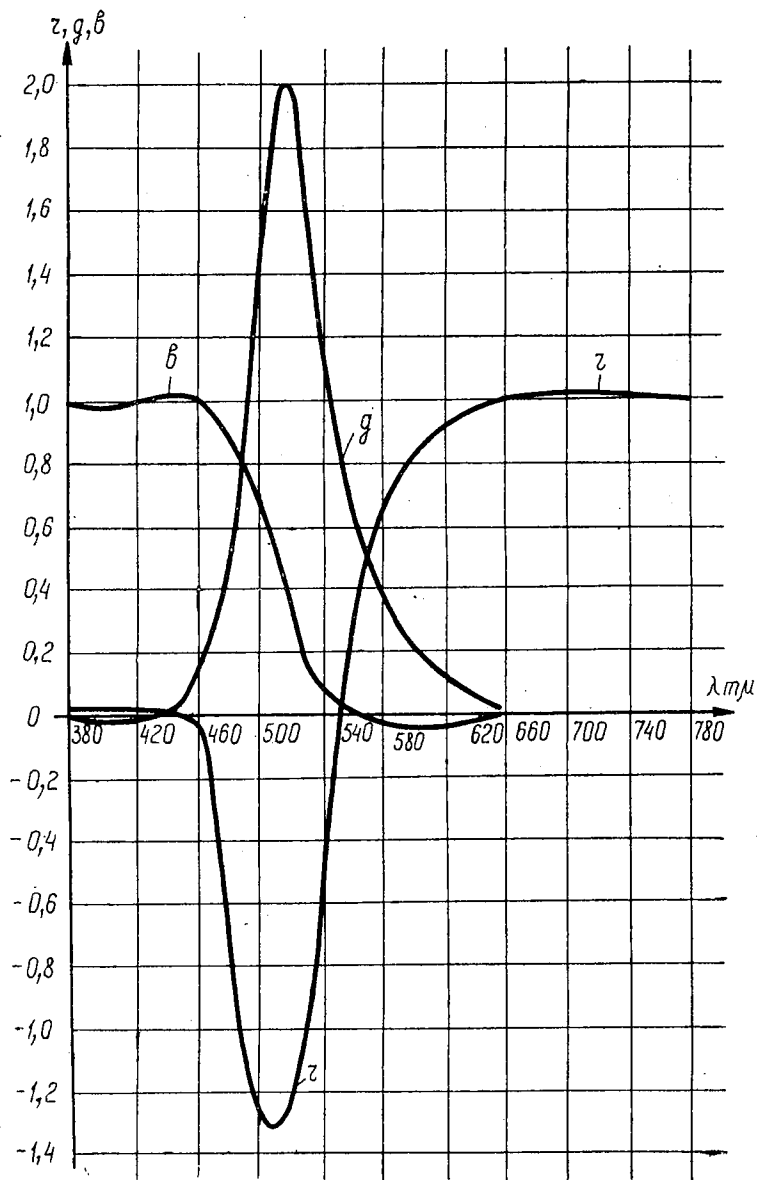


Рис. 7. Относительные цветные коэффициенты спектральных цветностей в системе R, G, B .

Когда колориметрист ставит себе задачу подобрать относительные коэффициенты r, g и b для получения различных спектральных

точки на оси говорило бы о большей или меньшей яркости этого света. Таким образом, скольжение изображающей точки вдоль оси (r' , g' или b') означает изменение яркости света неизменной цветности. При этом относительные цветовые коэффициенты остаются неизменными, а именно $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$ или $(0, 0, 1)$. Если бы точка, изображающая данный цвет, имела бы цветовые модули, например, 4, 6 и 10, то данный цвет имел бы цветность, характеризующуюся трехцветными коэффициентами 0,2, 0,3 и 0,5. При изменении яркости этого цвета (неизменной цветности), например, при возрастании яркости в полтора раза, все цветовые модули выросли бы соответственно и стали бы равны 6, 9 и 15, однако трехцветные коэффициенты сохранили бы свое прежнее значение, а изображающая точка цвета переместилась бы по прямой, соединяющей начало координат с первой точкой (по радиусу-вектору) на расстояние в полтора раза большее от центра, чем расстояние первой точки. Таким образом, каждой цветности (независимо от яркости) соответствует радиус-вектор определенного направления.

Это направление радиуса-вектора можно характеризовать углами, образуемыми им с координатными плоскостями или осями, однако нагляднее (и поэтому общепринято) направление радиуса-вектора характеризовать точкой пересечения его с плоскостью, отсекающей от координатных осей единичные отрезки (см. рис. 8). Пересечение этой плоскости с координатными плоскостями дает треугольник.

На рис. 9 изображен этот — «цветовой треугольник»; на рис. 8 и 9 он равносторонний, потому что единичные цвета r' , g' и b' изображаются отрезками одинаковой длины. Такое изображение проще и нагляднее. Надо, однако, иметь в виду, что при переходе от одной системы первичных к другой происходит неизбежное усложнение: единичные цвета не будут больше изображаться равными отрезками и будет потеряна ортогональность цветовой координатной системы (см. ниже, глава восьмая).

Изображение цветности на треугольнике предложено Максвеллом. Вершины этого треугольника соответствуют чистым первичным цветам. Принято правую вершину при основании приписывать красному, левую вершину при основании — синему, а третью вершину — зеленому первичным цветам. На рис. 8 координатные оси тоже направлены соответственно, а радиус-вектор OM , соответствующий некоторой цветности, пересекает плоскость

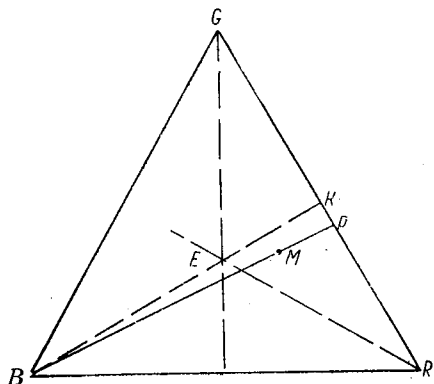


Рис. 9. Треугольник Максвелла в системе R, G, B .

в точке M . Эта точка обозначена той же буквой на рис. 9. Пусть некоторый цвет характеризуется $r' = g' = 1,2$; $b' = 0$. На рис. 8 радиус-вектор OKA соответствует такой цветности. Трехцветные коэффициенты будут: $r = 0,5$, $g = 0,5$ и $b = 0,0$. Этот радиус-вектор лежит поэтому в плоскости RG , а на рис. 9 точка (K) его пересечения с плоскостью лежит на стороне треугольника RG . Поскольку трехцветные коэффициенты r и g в этом случае одинаковы (оба равны 0,5), точка K лежит посередине стороны RG . Если бы цветность света определялась по-прежнему только двумя первичными цветами R и G , но трехцветные коэффициенты их не были бы равны (например, $r = 0,6$, а $g = 0,4$), то точка K лежала бы в полтора раза ближе к R , чем к G .

Можно сформулировать очень удобное и простое правило для нахождения на цветовом треугольнике Максвелла точки, изображающей данную цветность. Оно заключается в следующем: если данная цветность задана тремя трехцветными коэффициентами r , g и b , то надо по правилам нахождения центра тяжести точечных грузов найти положение искомой точки. Так, например, пусть имеем $r' = 0,5$, $g' = 0,65$, $b' = 0,3$ (рис. 8, точка M), тогда $r = 0,324$, $g = 0,448$ и $b = 0,228$. Центр тяжести первых двух лежит на стороне RG , как показано точкой P на рис. 9, а центр тяжести M всех трех цветов лежит на прямой BP ближе к P , так как точка P имеет вес $0,772 = (0,324 + 0,448)$, а точка $B = 0,228$. Разумеется, нахождение результирующей точки может быть произведено любым порядком суммирования весов первичных цветов.

Очевидно, что опорный цвет (например, белый равноинтенсивный), имеющий по определению трехцветные коэффициенты $r = g = b = 1/3$, изображается точкой E , лежащей на пересечении медиан цветового треугольника (рис. 9). Это положение справедливо всегда, а не только при равностороннем треугольнике.

Выше мы отметили, что для получения спектральных цветов на основе принятых трех первичных, иногда один из первичных следует брать со знаком «минус». Сейчас нам надо поэтому выяснить, каким образом находить точку цветности при одном отрицательном коэффициенте. Для решения этого вопроса следует вспомнить, что отрицательный знак коэффициента означает, что этот первичный цвет в сумме с искомым дает то же зрительное впечатление, что два других первичных вместе взятых. Пусть, например, искомая цветность имеет такие трехцветные коэффициенты: $r = 0,6$, $g = 0,8$ и $b = -0,4$. На рис. 10 точкой N обозначена точка, соответствующая цветности $rR + gG$. Теперь эту цветность смеси надо сложить с цветностью синего первичного, причем вес смеси равен 1,4, а синего первичного равен $-0,4$. По закону сложения сил мы имеем равнодействующую двух слагаемых (1,4 и $-0,4$), равную их разности, т. е. единице, а место приложения ее определяется равенством нулю суммы моментов слагаемых сил. Эта точка расположена, следовательно, на продолжении прямой BM за пределами треугольника. Ее расстояние от слагаемых сил обратно пропорционально величинам этих сил. На рис. 10

эта точка обозначена буквой *P*. Итак, цветности, имеющие один отрицательный трехцветный коэффициент, изображаются точками, лежащими за пределами треугольника.

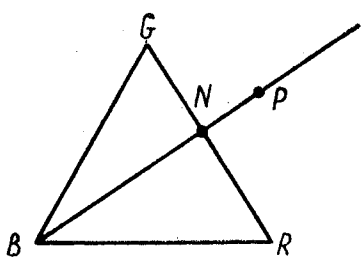


Рис. 10. Нахождение точки цветности при одном отрицательном коэффициенте.

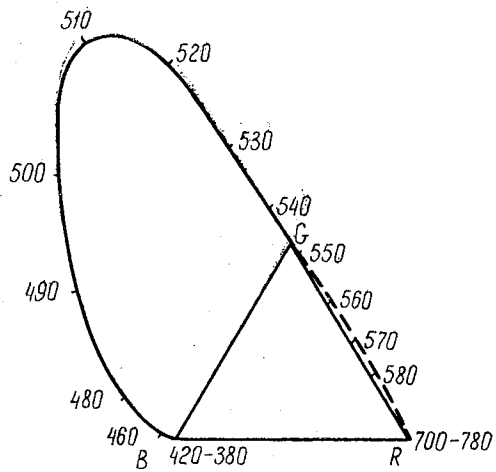


Рис. 11. Спектральный locus на треугольнике Максвелла в системе *R, G, B*.

Переходя от трехмерного цветового пространства к треугольнику Максвелла, мы теряем информацию о яркости цвета. По положению точки в треугольнике Максвелла мы можем узнать лишь о соотношении цветовых коэффициентов цвета в цветовом пространстве. Абсолютная величина цветовых модулей, т. е. яркость цвета, не может быть определена по треугольнику Максвелла.

Нанесем на треугольник Максвелла точки, соответствующие чистым спектральным цветностям. Такое построение осуществлено на рис. 11. Из таблицы 3 приложения видно, что цветность света длиной волны от 780 до 670 мμ одинакова. Поэтому точка *R* треугольника соответствует цветности света с длиной волны в указанном диапазоне. Свет с длиной волны от 670 до 550 мμ имеет цветность, получаемую сложением красного и зеленого с очень незначительным вычитанием синего. Кривая спектральных цветов (или, как ее принято называть, «спектральный locus») идет здесь поэтому почти точно вдоль стороны *RG* треугольника. Свет с длиной волны от 550 до 440 мμ имеет цветность, получающуюся при сложении синего и зеленого и вычитании (для некоторых длин волн весьма значительного) красного. Здесь спектральный locus весьма значительно выходит за пределы треугольника. Свет с длиной волны 440—380 мμ имеет цветность, весьма близкую к синему первичному. Здесь соответственная цветность может быть подобрана примешиванием к синему небольших долей красного и вычитанием ничтожных количеств зеленого. Locus и здесь выходит за пределы треугольника, однако

очень незначительно. Сторона треугольника RB соответствует цветностям, получающимся при смешении синего и красного. Ни одно монохроматическое излучение не дает таких цветностей. Они называются пурпурными.

Из рассмотрения рис. 11 видно, что тремя первичными цветами 700,0 546,1 и 435,8 м μ нельзя, суммируя их, воссоздать все спектральные цвета. Этот недостаток в практической вычислительной колориметрии обойден тем, что выбрана другая система первичных цветов, о чем мы скажем ниже, однако система R, G, B приобрела за последние годы опять большое практическое значение, так как цветное телевидение базируется именно на этих трех первичных цветах. Другими словами, при помощи цветного телевидения (где имеет место обязательно суммирование) не может быть воспроизведена любая цветность объекта, но это обстоятельство практически мало чувствительно, так как цветности реальных объектов в огромном большинстве случаев далеки от чисто спектральных и лежат ближе к белому, т. е. цветности подавляющего большинства реальных объектов изображаются точками, лежащими внутри треугольника, и могут быть получены суммированием первичных цветов.

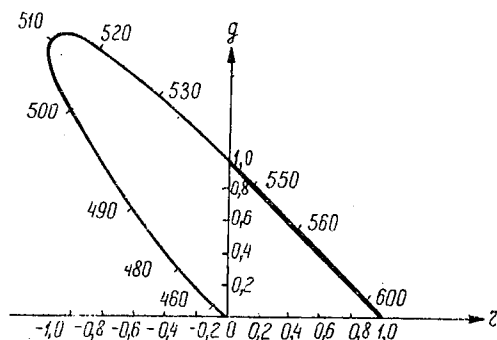


Рис. 12. Спектральный locus на цветовом графике в системе R, G, B .

Обычно вместо треугольника Максвелла пользуются цветовым графиком, представляющим собой проекцию треугольника Максвелла на какую-нибудь координатную плоскость, например RG . В этом случае получается фигура, изображенная на рис. 12. Это — равнобедренный прямоугольный треугольник. По катетам здесь непосредственно отложены относительные коэффициенты r и g . Гипотенуза представляет собой линию, вдоль которой сумма коэффициентов r и g равна единице, а коэффициент b для этих цветностей равен нулю.

Глава V

УДЕЛЬНЫЕ КООРДИНАТЫ

Отказ от исчерпывающего описания цвета при графическом изображении вызван не только переходом от трехмерного цветового пространства к треугольнику Максвелла и к его проекции — цветовой диаграмме. Даже сохранив непосредственное изображение цвета радиусами-векторами, мы фактически не добились бы лучшего положения. Опытom установлено (см. выше, четвертое основное правило колориметрии), что яркость смеси равна сумме яркостей ее компонентов. Если на осях координат откладывать длины, пропорциональные яркости первичных цветов, образующих данный цвет, то направление радиуса-вектора (проекциями которого являются отрезки, отложенные на координатных осях), по сказанному выше, определяет цветность цвета, а яркость его должна быть пропорциональна длине этого радиуса-вектора. При неизменной цветности света все как будто в порядке: увеличив все компоненты в некоторое число раз, мы увеличим и длину радиуса-вектора в это же число раз (об этом уже говорилось выше). Однако и здесь уже имеется одна неприятная черта: яркость смеси должна равняться сумме яркостей компонентов, а длина радиуса-вектора равна геометрической (векторной) сумме этих компонентов (и, конечно, не равна алгебраической сумме), а следовательно, масштаб яркости — один для проекций и другой для радиуса-вектора. Более того, при изменении цветности света без изменения его яркости, т. е. при изменении модулей первичных цветов, но при сохранении модуля смеси изменяется длина радиуса-вектора, так как геометрическая сумма не определяется суммой (алгебраической) компонентов, а зависит от распределения долей этой суммы по компонентам. (Например, если сумма яркостей равна 4 и вся яркость приходится на один первичный цвет, то радиус-вектор будет совпадать с этой проекцией и тоже будет равен четырем. Если же каждый из первичных цветов имеет яркость $4/3$, то сумма яркостей опять равна четырем, но радиус-вектор (диагональ куба с ребром $4/3$) будет теперь равен $\frac{4}{\sqrt{3}}$, т. е. будет в 1,73 раза меньше, тогда как яркость цвета осталась неизменной.)

Таким образом, не только у радиуса-вектора другой масштаб, чем у проекций, но у разных радиусов-векторов в зависимости от направления будут разные масштабы. Решение задачи такой первостепенной важности, как сложение двух цветов, также может быть произведено графически лишь для цветности. Яркость смеси должна равняться яркости слагаемых, а длина результирующего радиуса-вектора будет равняться геометрической сумме слагаемых векторов. При всем несовершенстве представления цветов в виде векторов, трехмерное цветовое пространство не только не оставлено, но приобретает в современной колориметрии все большее теоретическое и практическое значение.

Ниже, в главе восьмой, мы дополнительно займемся свойствами цветового пространства.

Если в поставленной задаче нас интересует только графическое определение цветности данного цвета в избранной системе первичных, то переход к треугольнику Максвелла, а через него к цветовому графику совершенно логичен.

Все же, если не графическим, то вычислительным путем мы должны уметь давать полное описание цвета. Конкретно, мы должны уметь дать ответ на вопрос, — что увидит наблюдатель, принимающий излучение данного спектрального состава (спектральный состав излучения задается распределением мощности по длинам волн в потоке или распределением яркости по длинам волн в случае излучающей поверхности). При этом удобно пользоваться так называемыми *удельными координатами*. Дадим определение, предложенное Комитетом технической терминологии АН СССР:

Удельными координатами или удельными цветовыми коэффициентами называются коэффициенты цветового уравнения, необходимые для получения монохроматического лучистого потока в один ватт.

Поясним это.

Пусть глаз наблюдателя принимает некоторый лучистый поток. Как указывалось раньше, зрительное впечатление, производимое таким потоком, соответствует световому потоку (12):

$$\Phi = 621 \int_{380}^{770} v_{\lambda} dF_{\lambda} = 621 \int_{380}^{770} v_{\lambda} \varphi_{\lambda} d\lambda. \quad (12)$$

Это выражение упрощается в случае монохроматического излучения и превращается в (11):

$$\Phi_{\lambda} = 621 v_{\lambda} F_{\lambda}. \quad (11)$$

В этих выражениях φ_{λ} — спектральная интенсивность, F_{λ} — лучистый поток (ватты), Φ — световой поток (люмены), v_{λ} — спектральная чувствительность глаза. В свое время для единичного цвета нами было написано равенство (23):

$$\Phi = rR + gG + bB. \quad (23)$$

То обстоятельство, что цвет в левой стороне является цветом монохроматического излучения, мы отметим индексом λ :

$$\Phi_{\lambda} = r_{\lambda}R + g_{\lambda}G + b_{\lambda}B. \quad (25)$$

Для получения дальнейших результатов нам надо от потоков перейти к яркостям (разумеется, поток, проникающий в глаз, пропорционален яркости источника, так что эти величины пропорциональны). В этой замене нет ничего принципиального, но закон колориметрии формулируется через яркость: «Яркость смеси равна сумме яркостей компонентов». Математически запишем это так:

$$L_{\lambda} = r_{\lambda}L_R + g_{\lambda}L_G + b_{\lambda}L_B. \quad (26)$$

Слева стоит яркость смеси, а в правой части — яркости первичных цветов. Относительные цветовые коэффициенты r , g и b снабжены также значками λ , так как имеют определенное значение, соответствующее длине волны цветности смеси. Эти значения содержатся в таблице 3 приложения.

Цвет, цветность которого соответствует (равна) цветности монохроматического излучения с длиной волны λ , а яркость которого равна единице, создается излучением, мощность которого W_{λ} зависит от длины волны λ . Чем меньше спектральная чувствительность глаза к данной длине волны λ , тем необходима большая мощность для создания единичного цвета.

Можно написать

$$W_{\lambda} = \frac{L_{\lambda}}{v_{\lambda}}. \quad (27)$$

Здесь мы не поставили коэффициента пропорциональности, величина которого зависит от выбранной единицы интенсивности излучения. Напомним, что единичная яркость L_{λ} , вычисляемая по (26) и стоящая в числителе (27), не остается постоянной, а зависит от длины волны, так как яркости первичных входят в разных количествах в яркость смеси (в зависимости от λ), а яркости первичных, согласно (24), неодинаковы и относятся между собой, как

$$L_R : L_G : L_B = 1 : 4,5907 : 0,0601.$$

Таким образом, в (27) и числитель и знаменатель меняются с длиной волны, что и отмечено индексами λ . Используя (27), можно (26) переписать следующим образом:

$$L_{\lambda} = v_{\lambda} W_{\lambda} = r_{\lambda}L_R + g_{\lambda}L_G + b_{\lambda}L_B. \quad (28)$$

Разделив обе части (28) на W_λ , мы получим цветное уравнение для монохроматического излучения *единичной мощности*: его яркость

$$\bar{L}_\lambda = v_\lambda = \bar{r}_\lambda L_R + g_\lambda L_G + b_\lambda L_B. \quad (29)$$

Новые коэффициенты \bar{r}_λ , g_λ и \bar{b}_λ , стоящие множителями при яркостях первичных цветов, называются *удельными координатами или удельными цветовыми коэффициентами*.

Из последних уравнений ясно, что

$$\bar{r}_\lambda = \frac{r_\lambda}{W_\lambda} = v_\lambda \frac{r_\lambda}{L_\lambda}; \quad (30)$$

$$g_\lambda = v_\lambda \frac{g_\lambda}{L_\lambda}; \quad (31)$$

$$\bar{b}_\lambda = v_\lambda \frac{b_\lambda}{L_\lambda}. \quad (32)$$

Прежде чем обсуждать полученный результат, проследим на численном примере вычисление удельных координат.

Пусть нам задано вычислить удельные координаты для $\lambda = 475$ миллимикрон. Относительные цветовые коэффициенты для этой длины волны берем из таблицы 3. Они равны

$$r = -0,2584, \quad g = 0,1840, \quad b = 1,0744.$$

Согласно (26), учитывая (24), получаем:

$$L = -0,2584 \cdot 1 + 0,1840 \cdot 4,5907 + 1,0744 \cdot 0,0601 = 0,6501.$$

Из таблицы 1 приложения берем значение спектральной чувствительности глаза для этой длины волны.

$$v_\lambda = 0,1126.$$

Теперь по (30) — (32) вычисляем удельные координаты.

Для r_λ имеем

$$\bar{r}_\lambda = 0,1126 \frac{-0,2584}{0,6501} = -0,04471.$$

Аналогично для двух других

$$\bar{g}_\lambda = 0,03183, \quad \bar{b}_\lambda = 0,18592.$$

Удельные координаты, вычисленные таким образом, приведены для всех длин волн (через 5 миллимикрон) в таблице 3 и изображены на рис. 13. Абсолютная величина удельных координат условна. Мы уже указывали при обсуждении равенства (27), что коэффициент пропорциональности нами умышленно опускается. Поясним

теперь это обстоятельство. Удельные координаты рассчитаны по яркостям первичных цветов. Но ведь абсолютные величины яркостей нам неизвестны, они зависят от яркости опорного цвета (в нашем случае белого равноинтенсивного), по которому производилась нормировка (т. е. выбор единицы) первичных цветов. Численные величины $1 : 4,5907 : 0,0601$ дают отношение яркостей первичных цветов, а не сами яркости. Эти величины называют поэтому «яркостными коэффициентами». Единица мощности, по отношению к которой определяются удельные координаты, тоже условна. Мы называли ее ваттом, воспользовавшись наиболее распространенной единицей, притом упомянутой в определении (см. выше), предложенном АН СССР, однако нигде этот выбор единицы в дальнейшем никак не отразился: число 621, связывающее (см. (11) и (12)) ватты и лю-

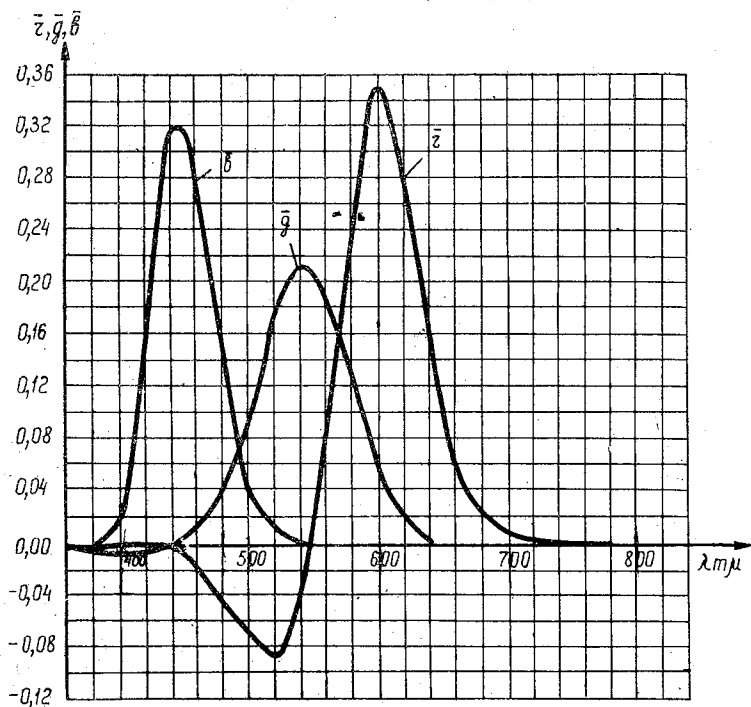


Рис. 13. Удельные координаты спектральных цветов в системе R, G, B .

мены, не вошло в (27). Таким образом, удельные координаты получаются с точностью до некоторого неизвестного множителя. Удельные координаты, помноженные на яркостные коэффициенты первичных цветов, дают нам интенсивности (с точностью до постоянного множителя) этих первичных цветов, требуемые для подбора данного спектрального цвета.

Удельные координаты различных спектральных цветов могут быть сопоставлены между собой и при таком сопоставлении и вы-

является, сколько единиц первичных цветов надо взять для получения зрительного впечатления, создаваемого монохроматическим излучением одной волны и монохроматическим излучением другой волны при одной и той же энергетической мощности в обоих случаях. Соотношение удельных координат для различных первичных при одной и той же длине волны монохроматического света, разумеется, такое же, как и соотношение трехцветных коэффициентов для этой длины волны (этим ведь определяется цветность), но абсолютная величина удельных координат зависит от спектральной чувствительности человеческого глаза и от видимой яркости единичного монохроматического цвета. Если сами абсолютные величины известны только с точностью до некоторого множителя, то при сравнении удельных координат для различных длин волн этот множитель исчезает. Так, например, из таблицы 4 приложения видно, что для создания зрительного впечатления, подобного впечатлению от монохроматического излучения с длиной волны 700, 750 и 775 микрон (при условии их одинаковой интенсивности), удельные координаты будут: при $\lambda = 700$, $\bar{r} = 0,00410$ (остальные нуль), для $\lambda = 750$, $\bar{r}_\lambda = 0,00012$ и для $\lambda = 775$, $\bar{r}_\lambda = 0,00001$. Во всех этих случаях трехцветные коэффициенты одинаковы (1, 0, 0) и таково же соотношение и удельных координат. Но вследствие падения спектральной чувствительности глаза от 700 к 775 мк удельная координата красного первичного падает в 410 раз (остальные равны нулю).

Таким образом, соотношение удельных координат для данного монохроматического излучения дает цветность излучения (как и относительные цветовые коэффициенты, соотношение которых такое же, как и удельных координат). Для данной длины волны абсолютные значения удельных координат не имеют никакого смысла. С полным правом можно было бы все значения удельных координат, приведенные в таблице 4, помножить на любое число, и при этом ничего бы не изменилось, так как существенно соотношение удельных координат для различных длин волн (одной и той же энергетической интенсивности), а это соотношение при умножении всех чисел таблицы 4 на одно и то же число не изменится.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ЦВЕТА

Для лучшего усвоения изложенного выше материала приведем следующий пример.

Пусть дана поверхность, излучение которой графически изображено на рис. 14. Здесь на оси абсцисс отложена длина волны излучения в миллимикронах, а на оси ординат — спектральная плотность излучения с единицы площади в единице телесного угла. Если бы речь шла не об излучении, а о свете, то можно было бы сказать, что на оси ординат отложена спектральная плотность яркости. Спрашивается: какой цвет (т. е. какую цветность и какую яркость) увидит наблюдатель?

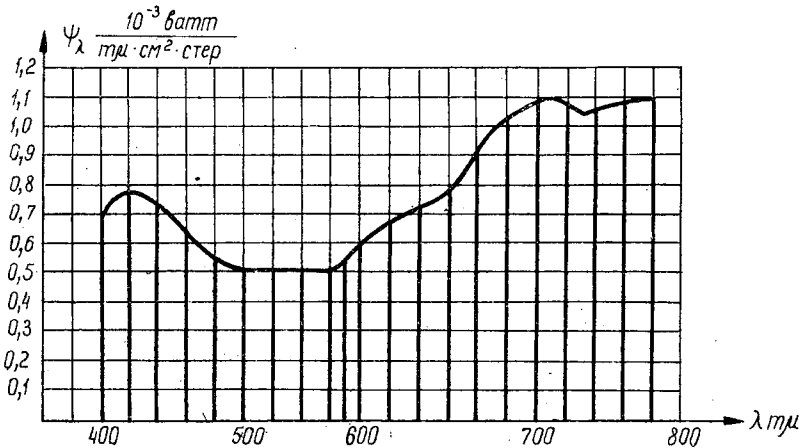


Рис. 14. Вспомогательный график для расчета цвета излучения.

Для решения этой задачи следует поступить следующим образом: кривая на рис. 14 должна быть разбита на участки, в пределах каждого из которых излучение можно рассматривать как монохром-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
№№ орди- нат	λ , м μ	v_λ	ψ_λ	$\Delta\lambda$	$\Delta F_{\Omega S} =$ $= \psi_\lambda \cdot \Delta\lambda$	$v_\lambda \cdot \psi_\lambda \cdot \Delta\lambda$	$\bar{r}_\lambda \cdot 10^5$	$\bar{g}_\lambda \cdot 10^5$	$\bar{b}_\lambda \cdot 10^5$	$r'_\lambda =$	$g'_\lambda =$	$b'_\lambda =$
			10^{-3} вт							м μ	$= \bar{r}_\lambda \cdot \psi_\lambda \cdot \Delta\lambda$	$= \bar{g}_\lambda \cdot \psi_\lambda \cdot \Delta\lambda$
			10^{-3} вт м μ стр см 2	м μ								
1	410	0,0012	0,75	20	15,0	0,018	84	— 41	3707	1,26	—0,615	55,5
2	430	0,0116	0,78	20	15,6	0,18	218	—119	24769	3,40	—1,85	386
3	450	0,038	0,70	20	14,0	0,532	—1213	678	31670	—16,9	9,5	434
4	470	0,091	0,60	20	12,0	1,09	—3933	2538	22991	—48,0	30,5	276
5	490	0,208	0,53	20	10,6	2,21	—5814	5689	8257	—61,7	60,3	90,2
6	510	0,503	0,51	20	10,2	5,13	—8901	12860	2698	—91,0	132	27,5
7	530	0,862	0,52	20	10,4	9,00	—7101	20317	549	—74,0	212	5,70
8	550	0,995	0,52	20	10,4	10,1	2279	21178	— 58	23,7	220	—0,603
9	565	0,979	0,53	10	5,3	5,18	12840	17522	— 138	67,9	93,0	—0,73
10	575	0,915	0,58	10	5,8	5,30	20715	15429	—123	120	89,3	—0,714
11	590	0,757	0,65	20	13,0	9,90	30928	9754	— 79	402	127	—1,03
12	610	0,503	0,71	20	14,2	7,15	33971	3557	— 30	482	50,4	—0,426
13	630	0,265	0,74	20	14,8	3,92	22677	833	— 8	336	12,3	—0,118
14	650	0,107	0,85	20	17,0	1,82	10167	116	— 1	173	1,97	—0,017
15	670	0,032	1,00	20	20,0	0,640	3149	11	—	63,0	0,22	—
16	690	0,0082	1,05	20	21,0	0,173	819	—	—	17,3	—	—
17	710	0,0021	1,10	20	22,0	0,0464	210	—	—	4,62	—	—
18	730	0,00052	1,05	20	21,0	0,0109	52	—	—	1,10	—	—
19	750	0,00012	1,07	20	21,4	0,00257	12	—	—	0,256	—	—
20	770	0,00003	1,09	20	21,8	0,000655	3	—	—	0,0654	—	—

$$\Sigma \psi_\lambda \cdot \Delta\lambda = 295,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{вт}}{\text{стр} \cdot \text{см}^2}$$

$$\Sigma \psi_\lambda \cdot v_\lambda \cdot \Delta\lambda = 62,41 \cdot 10^{-3} \frac{\text{вт (приведенная к } \lambda = 555 \text{ м}\mu)}{\text{стр} \cdot \text{см}^2}$$

$$B = 621 \cdot \Sigma \psi_\lambda \cdot v_\lambda \cdot \Delta\lambda = 38,8 \frac{\text{лм}}{\text{стр} \cdot \text{см}^2} (\text{сб}).$$

матическое с определенной интенсивностью. Поэтому там, где кривая совершает резкий скачок, следует производить деление на более мелкие участки, там же, где кривая идет плавно, величина участков может быть больше (для уменьшения объема работы), однако все же в пределах каждого участка чувствительность глаза должна мало изменяться (это и есть условие представления узкого диапазона длин волн в виде монохроматического излучения). В нашем примере мы считали наибольшую допустимую ширину участка равной 20 м μ и разделили так весь график, за исключением области близ 570 м μ , где резкий скачок кривой вынудил нас взять два участка по 10 м μ .

Решение задачи приведено в таблице к рис. 14.

Здесь в первом столбце приведены номера участков, во втором—длины волн, соответствующие серединам участков,—это длины волн того квазимонохроматического излучения, которое представлено данным участком.

В третьем столбце приведена спектральная чувствительность человеческого глаза для длин волн, приведенных во втором столбце. Эти данные взяты из таблицы 1 приложения.

В четвертом столбце приведены ординаты кривой, соответствующие серединам диапазонов. Ординаты указаны в милливаттах/миллимикрон стерад $см^2$.

В пятом столбце даны ширины диапазонов в м μ .

В шестом столбце дана мощность (с $см^2$ в стерад.) для данного диапазона. Графически — это площадь данного участка кривой, т. е. произведение диапазона длин волн на спектральную плотность. Просуммировав все числа этого столбца, получим полную мощность/ $см^2$ стерад, для всего излучения. Графически такая сумма изображается всей площадью, ограниченной осью абсцисс, крайними ординатами и кривой. Численно такая сумма равна

$$\Sigma \phi_{\lambda} \cdot \Delta\lambda = 295,5 \cdot 10^{-3} \frac{вт}{стр\ см^2}$$

и соответствует выражению (9) первой главы. Эта цифра, однако, не дает ничего для суждения о том, что увидит глаз, так как восприятие глазом зависит от распределения интенсивности по длинам волн.

В седьмом столбце произведено перемножение интенсивности (мощность/ $см^2$ стерад.) данного участка на спектральную чувствительность глаза для этой волны (произведение данных третьего и шестого столбцов). Данные этого столбца пропорциональны яркости данного участка спектра. Если бы данные каждого участка помножить на 621, была бы получена яркость (люмен/ $см^2$ стерад.) данного участка спектра излучения нашей поверхности. Мы, однако, такого перемножения не произвели, а просуммировали все данные

этого столбца и уже сумму помножили на 621. Таким образом, получилось

$$B = 621 \sum_{\lambda} \bar{\psi}_{\lambda} \Delta\lambda = 38,8 \frac{\text{лм}}{\text{см}^2 \cdot \text{стр}} (\text{сб})$$

в соответствии с (10) главы первой.

Итак, мы получили первую информацию о цвете данной поверхности: узнали ее яркость. Теперь надо узнать цветность этой поверхности, и для этого придется воспользоваться удельными координатами.

В 8, 9 и 10 столбцах таблицы приведены удельные координаты (помноженные на 10^5), взятые из таблицы 3 приложения для длин волн, указанных во втором столбце. Напоминаем, что удельные координаты для всех длин волн соответствуют одной и той же интенсивности излучения. Помножив каждую из удельных координат на интенсивность соответственного излучения (все равно, в каких единицах, только одних и тех же во всех случаях), мы получим (в условных единицах) цветовые модули g'_{λ} , r'_{λ} , b'_{λ} первичных цветов, дающих в сумме такое же зрительное ощущение, как и зрительное ощущение, вызываемое данным монохроматическим излучением.

В столбцах 11, 12 и 13 приведены результаты такого перемножения (так как абсолютная величина роли не играет, то для упрощения записи каждое произведение помножено еще на 10^3). Цветовые компоненты первичных цветов для всего света, излучаемого поверхностью, должны быть получены суммированием цветовых компонент отдельных спектральных участков. Такое суммирование приводит к следующим результатам:

$$r' = \sum \bar{r}_{\lambda} \psi_{\lambda} \Delta\lambda = 1407;$$

$$g' = \sum \bar{g}_{\lambda} \psi_{\lambda} \Delta\lambda = 1036;$$

$$b' = \sum \bar{b}_{\lambda} \psi_{\lambda} \Delta\lambda = 1271.$$

На основании этих данных определяем цветовой модуль:

$$r' + g' + b' = 3714,$$

а отсюда находим относительные цветовые коэффициенты цвета:

$$r = \frac{r'}{r' + g' + b'} = 0,380; \quad g = 0,279; \quad b = 0,341.$$

Таким образом, задача решена: мы узнали и яркость и цветность цвета, который увидит наблюдатель. На рис. 15 и 16 на треугольнике Максвелла и на цветовой диаграмме точкой M обозначена цветность

цвета, определенного в этой задаче. Чтобы представить себе, о какой же цветности идет речь, обратим внимание, что точка M лежит между белым равноинтенсивным (точка O) и длиной волны 600 мμ на спектральном локусе. Таким образом, цветность данного света может

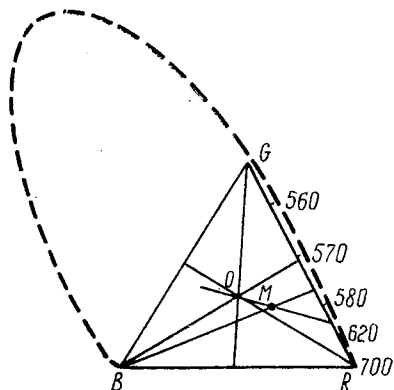


Рис. 15. Треугольник Максвелла с изображением цветности, полученной расчетом.

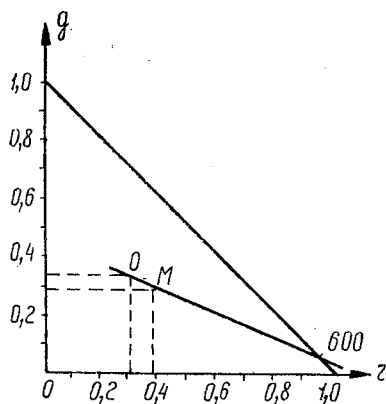


Рис. 16. Цветовой график с изображением цветности, полученной расчетом.

быть охарактеризована так: «белый с примесью оранжевого» или, наоборот, «оранжевый, сильно разбавленный белым».

Глава VII

СИСТЕМА МКО (X, Y, Z)

На протяжении этого курса нам неоднократно приходилось отмечать, что суммированием трех основных цветов нельзя получить всех реальных цветностей. Из рисунков и таблиц, приведенных выше, можно установить даже, что ни один спектральный цвет с длиной волны меньше $675 \text{ м}\mu$ не может быть осуществлен суммированием первичных: и трехцветные коэффициенты n , следовательно, удельные координаты для всех спектральных цветов имеют два положительных значения и одно — отрицательное. Следовательно, во всех этих случаях должно иметь место вычитание цвета, что понятно и полезно при выполнении фотометрического и колориметрического измерения, однако не может быть использовано для получения реального цвета на практике (например, в телевидении). Если большинство цветностей, встречающихся на практике, далеко от спектральной насыщенности, что позволяет с успехом пользоваться тремя первичными R, G, B (например, в телевидении для образования сложного цвета объекта), то простота производства расчетов и наглядность графического изображения цветов сильно страдают от неизбежности вычитания. Поэтому в настоящее время общепринятой для использования в технических и коммерческих целях является система, основанная на трех других первичных цветах: X, Y и Z . Она предложена МКО (Международной Комиссией по Освещению), которая утвердила также значения спектральной чувствительности человеческого глаза, трехцветных коэффициентов и удельных координат спектральных цветов как в системе R, G, B , так и в системе X, Y, Z , приведенные в соответственных таблицах приложения. Эти три цвета лежат за пределами спектрального локуса, т. е. невозпроизводимы реально не только при помощи прежних трех первичных цветов, но и при помощи каких-либо реальных цветов вообще. Таким образом, эти новые первичные цвета являются нереальными цветами. Треугольник, построенный на этих новых первичных цветах, обнимает собой все реальные цвета и весь спектральный локус.

Переходя к системе новых первичных, надо было постараться сделать эту новую систему наиболее удобной для вычислительных целей. Первое свойство этой системы — расположение первичных за

пределами области реальных цветностей приводит к тому, что координаты цветности любого цвета даются только положительными значениями относительных коэффициентов.

Второе вычислительное преимущество системы X, Y, Z состоит в легкости определения яркости цвета. Здесь не придется суммировать яркости первичных: яркость результирующего цвета просто равна яркости первичной Y . Для этого новые первичные цвета наделяются таким свойством: отношение их яркостных коэффициентов принимается равным

$$L_X : L_Y : L_Z = 0 : 1 : 0. \quad (33)$$

Чтобы пояснить это свойство, обратимся к вопросу о яркости какого-нибудь единичного цвета L_N , который, согласно (23), может быть записан так:

$$N = rR + gG + bB.$$

Яркость этого цвета равна сумме яркостей первичных, составляющих его

$$L_N = rL_R + gL_G + bL_B. \quad (34)$$

С другой стороны, яркостные коэффициенты единичных первичных относятся, как в (24):

$$L_R : L_G : L_B = 1 : 4.5907 : 0.0601.$$

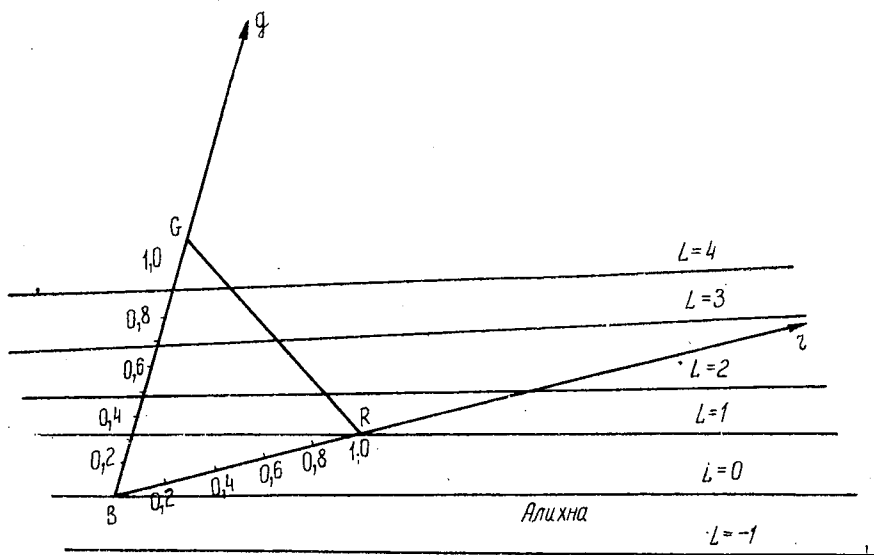


Рис. 17. Косоугольная система координат r, g и линии равной яркости. а сумма трехцветных коэффициентов должна равняться единице $r + g + b = 1$.

поэтому в (34) можно b заменить через

$$b = 1 - (r + g) \quad (35)$$

и, подставив (35) в (34), получить

$$L_N = 0,9399 r + 4,5306 g + 0,0601. \quad (36)$$

Пусть L_N в (36) равно некоторой постоянной величине, тогда получим уравнение прямой в косоугольной системе координат r, g , в которой координаты r измеряются отрезком BR (рис. 17), принятым за единицу, координаты g — отрезком BG , принятым за единицу, и начало координат лежит в точке B . Для построения прямой достаточно знать две ее точки. Пусть, например, L_N равно 1. В таком случае (36) примет вид:

$$0,9399 r + 4,5306 g + 0,0601 = 1.$$

Ясно, что при $r = 0$ $g = \frac{0,9399}{4,5306} = 0,214$,

а при $g = 0$ $r = \frac{0,9399}{0,9399} = 1,000$.

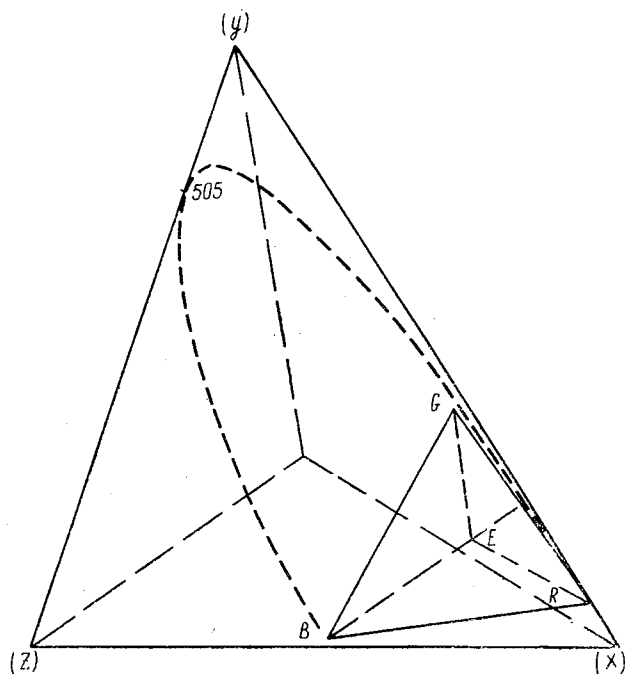


Рис. 18. Положение первичных цветностей системы X, Y, Z , предложенной МКО, нанесенное на чертеже с треугольником Максвелла в системе R, G, B .

Через эти две точки и проведена на рис. 17 прямая $L = 1$. Остальные линии равной яркости построены тем же способом.

Внутри треугольника RGB яркости всегда положительны, но за пределами его можно найти цвета с нулевой или даже отрицательными яркостями. Подобные прямые также имеются в семействе, построенном на рис. 17. В частности, линия $L_N=0$ называется «алихна», что значит «бесцветная». Два первичных цвета системы X, Y, Z и выбраны на алихне. Алихна совпадает, таким образом, со стороной ZX нового цветового треугольника (рис. 18).

Вторая сторона YX нового треугольника проведена таким образом, чтобы она касалась длинноволнового конца спектрального локуса. Это приведет к тому, что один из трехцветных коэффициентов (именно z) окажется равным нулю для всей длинноволновой области и еще более упростит расчеты. Таким образом, пересечение этой касательной с алихной дает точку x нового треугольника. Третья сторона нового треугольника выбирается так, чтобы все реальные цвета лежали внутри треугольника и чтобы эта третья сторона проходила как можно ближе к спектральному локусу. Поэтому третья сторона является касательной к спектральному локусу примерно близ $505 \text{ м}\mu$.

Новый треугольник, построенный указанным образом, должен еще быть нормирован так, чтобы белый равноинтенсивный свет являлся бы для него опорным. Вопрос о нормировке новых первичных по цветности и по яркостным коэффициентам рассмотрен в следующей главе. Ясно, однако, что если яркостные коэффициенты x и z равны нулю, яркостный коэффициент y должен быть равен $5,6508$ (так как сумма яркостных коэффициентов первичных R, G, B тоже

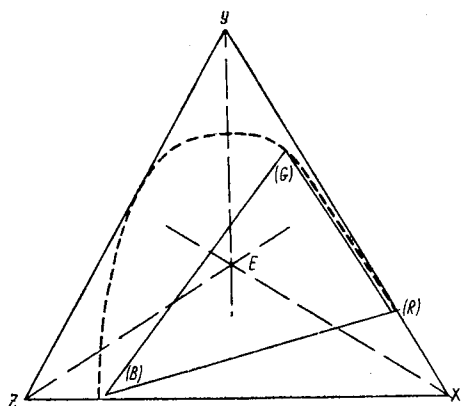


Рис. 19. Треугольник Максвелла в системе X, Y, Z , предложенной МКО.

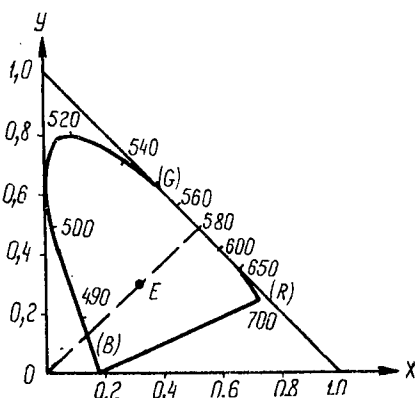


Рис. 20. Цветовой график в системе X, Y, Z , предложенной МКО.

равнялась $1 + 4,5907 + 0,0601 = 5,6508$). Соотношение яркостных коэффициентов в новой системе будет поэтому

$$L_x : L_y : L_z = 0 : 5,6508 : 0,$$

однако обычно это отношение пишут $0 : 1 : 0$, разделив на $5,6508$, как

мы это сделали в (33). Математически это, конечно, совершенно верно, однако следует заметить, что при этом яркостный масштаб при сравнении одной системы с другой оказывается искаженным.

На рис. 19 изображен треугольник Максвелла в системе X, Y, Z и спектральный locus, заключенный внутри этого графика. Белый равноинтенсивный цвет E лежит в центре тяжести треугольника. На рис. 20 приведен цветовой график для системы X, Y, Z .

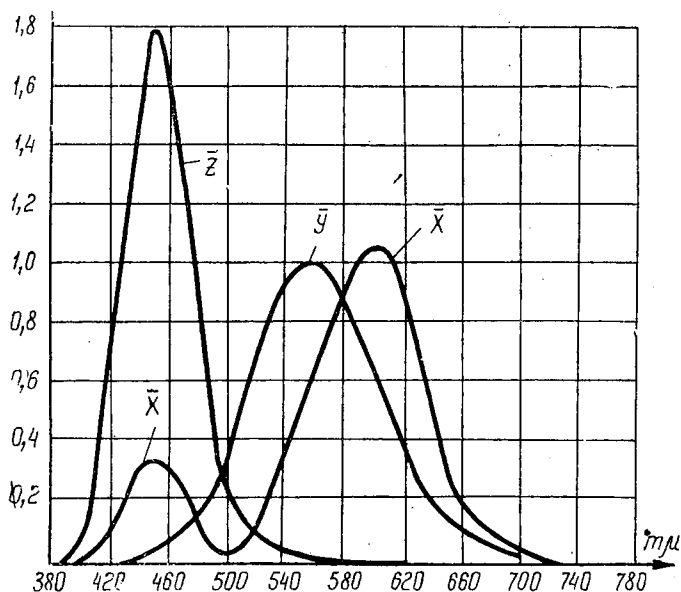


Рис. 21. Удельные координаты спектральных цветов в системе X, Y, Z .

В новой системе так же, как и в прежней, могут быть найдены относительные цветовые коэффициенты и удельные координаты (соответственно x, y, z и $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$) спектральных цветов. Они приведены в приложении (таблица 4). На рис. 21 приведены удельные координаты $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$. Следует обратить внимание на отсутствие отрицательных значений координат и на наличие минимума (очень глубокого) у координаты \bar{x} . Этот минимум имеет место близ волн 505 μm , где сторона YZ нового треугольника касается спектрального locusа.

Глава VIII

ПЕРЕХОД ОТ СИСТЕМЫ R, G, B К СИСТЕМЕ X, Y, Z , ПРЕДЛОЖЕННОЙ МКО

В практике колориметриста нередко может встретиться необходимость пересчитать компоненты цвета, заданные в одной системе первичных цветов в компоненты другой системы первичных. В практике цветного телевидения это имеет место, когда первичные цвета на входе телевизионного тракта не соответствуют первичным цветам приемного устройства.

Переход к новой системе первичных сопряжен с алгебраическими преобразованиями, отнюдь не сложными принципиально, но достаточно длинными, чтобы было полезно дать к ним пояснения. Мы проследим ход этих вычислений на переходе от системы R, G, B к системе X, Y и Z , предложенной МКО.

Треугольник XYZ изображен на рис. 18. Две его вершины Z и X лежат на ахисне, т. е. сторона XZ удовлетворяет уравнению:

$$0,9399 r + 4,5306 g + 0,0601 = 0, \quad (37)$$

вторая сторона — XY — касательна к длинноволновому, а третья — YZ — к зеленому участку спектрального локуса. В результате вычислений, которые мы здесь не приводим, получаются следующие уравнения для цветов (X), (Y) и (Z), единичных в системе R, G, B (эти единичные цвета мы обозначаем соответственными буквами в скобках):

$$(X) = (r'_x)R + (g'_x)G + (b'_x)B = 1,2750 R - 0,2778 G + 0,0028B, \quad (38')$$

$$(Y) = (r'_y)R + (g'_y)G + (b'_y)B = -1,7393R + 2,7673G - 0,0280B, \quad (38'')$$

$$(Z) = (r'_z)R + (g'_z)G + (b'_z)B = -0,7431R + 0,1409G + 1,6022B; \quad (38''')$$

здесь $(r'_x) \dots (b'_z)$ — цветовые модули цветов (X), (Y) и (Z), единичных в системе R, G, B . Сумма коэффициентов $(r'_x) + (g'_x) + (b'_x)$ и т. д. в каждой строчке равна единице (единичные цвета), и, как это и должно быть у единичных цветов, цветовые модули равны в этом случае относительным цветовым коэффициентам: $(r'_x) = (r_x)$ и т. д. Однако, как это видно из рис. 18, белый равноинтенсивный более не

является опорным цветом, так как не лежит в центре нового треугольника. Новый треугольник не является также равносторонним; однако это совершенно не принципиальное свойство. Если мы и в новой системе хотим сохранить цвет E в качестве опорного, надо изменить интенсивность новых первичных, не изменяя цветности их. Эти измененные значения X , Y и Z (без скобок) и будут единичными в новой системе, но каждый из них в прежней системе R , G , B единичным больше не будет. В сумме и три единичных первичных в старой системе и три единичных первичных в новой системе должны дать белый равноинтенсивный, так что должно иметь место равенство:

$$X + Y + Z = R + G + B. \quad (39)$$

Задача перенормировки новых первичных состоит, следовательно, в нахождении каких-то трех множителей α , β и γ , при помощи которых единичные цвета (X), (Y) и (Z) в системе R , G , B превратятся в единичные в новой системе. Таким образом,

$$\alpha \cdot (X) = X; \quad \beta \cdot (Y) = Y; \quad \gamma \cdot (Z) = Z.$$

С другой стороны, согласно (39),

$$\alpha \cdot (X) + \beta \cdot (Y) + \gamma \cdot (Z) = R + G + B.$$

Для осуществления последнего требования нужно, чтобы имели место равенства:

$$\left. \begin{aligned} \alpha(r'_x) + \beta(r'_y) + \gamma(r'_z) &= 1,2750 \alpha - 1,7393 \beta - 0,7431 \gamma = 1; \\ \alpha(g'_x) + \beta(g'_y) + \gamma(g'_z) &= -0,2778 \alpha + 2,7673 \beta + 0,1409 \gamma = 1; \\ \alpha(b'_x) + \beta(b'_y) + \gamma(b'_z) &= 0,0028 \alpha - 0,0280 \beta + 1,6022 \gamma = 1. \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Определитель этой системы

$$D = \begin{vmatrix} (r'_x) & (r'_y) & (r'_z) \\ (g'_x) & (g'_y) & (g'_z) \\ (b'_x) & (b'_y) & (b'_z) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1,2750 & -1,7393 & -0,7431 \\ -0,2778 & 2,7673 & 0,1409 \\ 0,0028 & -0,0280 & 1,6022 \end{vmatrix} = 4,8832,$$

откуда

$$\alpha = \frac{1}{D} = \begin{vmatrix} 1 \cdot (r'_y) \cdot (r'_z) \\ 1 \cdot (g'_y) \cdot (g'_z) \\ 1 \cdot (b'_y) \cdot (b'_z) \end{vmatrix} = \frac{9,0565}{4,8832} = 1,8546$$

и аналогично два других множителя

$$\beta = 0,5155 \text{ и } \gamma = 0,6299.$$

Умножая построчно (38) на эти коэффициенты, получаем:

$$\left. \begin{aligned} X &= r'_x R + g'_x G + b'_x B = 2,36461R - 0,51515G + 0,00520B \\ Y &= r'_y R + g'_y G + b'_y B = -0,8654 R + 1,42640G - 0,01441B \\ Z &= r'_z R + g'_z G + b'_z B = -0,46807R + 0,08875G + 1,00921B \end{aligned} \right\} . \quad (41)$$

В последних выражениях цветность каждого из цветов X , Y и Z сохранилась прежней, так как соотношение компонентов r'_x , g'_x и b'_x такое же, как было соотношение (r'_x) , (g'_x) и (b'_x) в (38), однако в (41) эти цвета более не являются единичными (сумма цветных коэффициентов $r'_x + b'_x + g'_x$ и аналогично для других строк более не равна единице). В системе же, где X , Y и Z приняты за единичные, опорным цветом опять является белый равноинтенсивный цвет E . В этом легко убедиться суммированием $r'_x + r'_z + r'_y$ и т. д. Все эти суммы оказываются равными единице, и требование (39) тем самым — выполненным.

На рис. 19 изображен треугольник XYZ , начерченный равносторонним, в центре которого находится белый равноинтенсивный цвет E . На этом рисунке треугольник RGB деформирован таким образом, что цвет E более не лежит в его центре. Проекция треугольника XYZ на плоскость XY и дает цветовой график, изображенный на рис. 20.

Выражения для первичных цветов R , G и B (с опорным цветом E), выраженные в компонентах системы XYZ , получаем, решая систему (41):

$$\left. \begin{aligned} R &= x'_r X + y'_r Y + z'_r Z = -0,49000X + 0,17697Y + 0,00000Z \\ G &= x'_g X + y'_g Y + z'_g Z = 0,31000X + 0,81240Y + 0,01000Z \\ B &= x'_b X + y'_b Y + z'_b Z = 0,2000 X + 0,01063Y + 0,99000Z \end{aligned} \right\} . \quad (42)$$

В системе X, Y, Z эти цвета не будут единичными (сумма компонентов каждого цвета не равна единице), но условие (39) здесь выполнено.

Для единичных в системе X, Y, Z цветов, по цветности совпадающих с цветностями первичных цветов R, G, B , т. е. совпадающих с цветностью монохроматического излучения длины волны 700,0 546,1 и 435,8 мμ, выражения можно получить следующим образом. Для единичных цветов цветовой модуль численно равен относительному цветовому коэффициенту. Поэтому непосредственно по таблице 4 имеем, например, для волны 700,0 мμ

$$(x'_r) = x_{700} = 0,7347; \quad (y'_r) = y_{700} = 0,2653; \quad (z'_r) = z_{700} = 0,0000.$$

Поэтому

$$(R) = x'_r X + (y'_r) Y + (z'_r) Z = 0,7347X + 0,2653Y + 0,0000Z \quad (43')$$

и также

$$(G) = (x'_g)X + (y'_g)Y + (z'_g)Z = 0,2737X + 0,7141Y + 0,0088Z; \quad (43'')$$

$$(B) = (x'_b)X + (y'_b)Y + (z'_b)Z = 0,1666X + 0,0089Y + 0,8246Z. \quad (43''')$$

Смесь цветов по уравнениям (43) не дает белого равноинтенсивного. Эти цвета и нанесены на рис. 19.

Мы еще не решили поставленной задачи, но уже на данном этапе решения ее можем отметить поучительное заключение, что переход от одной системы первичных цветов к другой сопряжен с деформацией цветового пространства или, как говорят, с изменением цветовой метрики, вместе с изменением направления векторов трех первичных цветностей в цветовом пространстве изменяется величина единичных цветов и тем самым масштаб пространства. На рис. 22 показан один и тот же опорный цвет OA в двух различных системах первичных цветов X_1, Y_1, Z_1 и X_2, Y_2, Z_2 . На обоих чертежах рис. 22

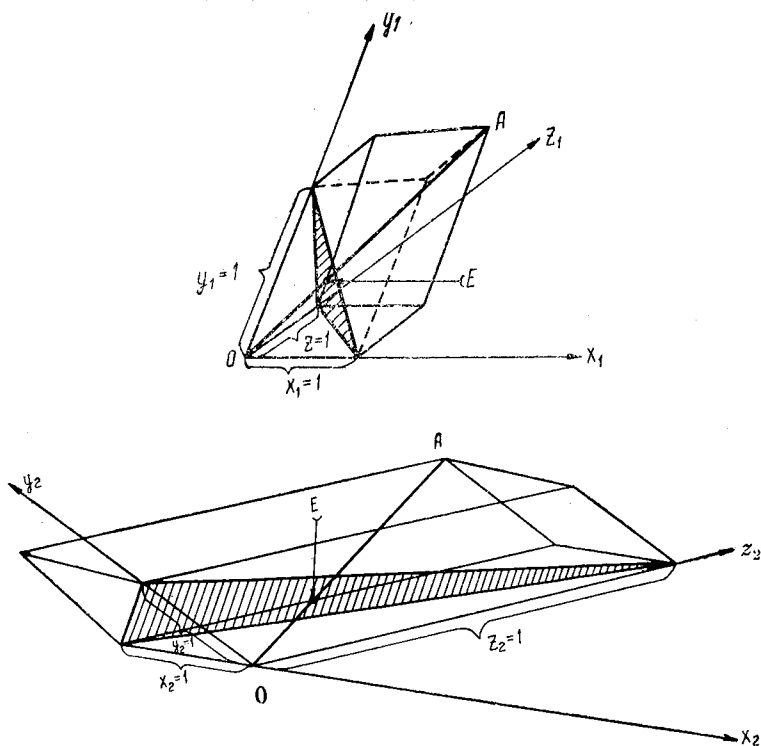


Рис. 22. Опорный цвет E в двух различных произвольных системах первичных цветов X_1, Y_1, Z_1 и X_2, Y_2, Z_2 .

этот опорный цвет имеет одну и ту же величину и направление. Первичные, образующие в сумме этот цвет, являются по определению единичными цветами. Ясно, что первичные цвета, являясь единич-

ными в своей системе, будучи перенесены в другую систему, перестанут быть единичными (хотя и будут в сумме образовывать опорный цвет системы, куда они перенесены). Эта деформация цветового пространства нашла свое отражение и в деформации цветового треугольника и цветовой диаграммы. На рисунке 22 на обоих чертежах пересечение вектора опорного цвета с плоскостью (111) треугольника Максвелла (заштрихованы на рисунке) обозначено буквой E . Как и должно быть, на обоих чертежах эта точка лежит на пересечении медиан треугольника.

Пусть нам дан цвет, который в одной системе записывается как

$$N = r'R + g'G + b'B,$$

а в другой как

$$N = x'X + y'Y + z'Z.$$

Тем самым должно существовать равенство

$$r'R + g'G + b'B = x'X + y'Y + z'Z. \quad (44)$$

Здесь r' , g' и b' и x' , y' и z' — цветовые модули цвета N в одной и другой системе первичных. Связь первичных одной и другой системы дается системой уравнений (41). Подставляя X , Y и Z из (41) в (44) и приравнявая коэффициенты при R , G и B , получаем

$$\left. \begin{aligned} r' &= r'_x x' + r'_y y' + r'_z z' \\ g' &= g'_x x' + g'_y y' + g'_z z' \\ b' &= b'_x x' + b'_y y' + b'_z z' \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Этой системой уравнений решена задача нахождения цветовых компонентов цвета в системе R , G , B , если известны цветовые модули относительно осей X , Y и Z . Кроме того, должны быть известны цветовые модули цветов X , Y и Z (первичных в системе X , Y , Z) относительно осей системы R , G , B . Система (45) может быть решена и относительно x' , y' и z' и, таким образом, может быть решена обратная задача — вычисление цветовых компонентов x' , y' и z' , если известны цветовые компоненты этого же цвета r' , g' и b' . По обычным правилам решения системы трех уравнений находим:

$$x' = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} r' & r'_y & r'_z \\ g' & g'_y & g'_z \\ b' & b'_y & b'_z \end{vmatrix} \quad y' = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} r'_x & r' & r'_z \\ g'_x & g' & g'_z \\ b'_x & b' & b'_z \end{vmatrix} \quad z' = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} r'_x & r'_y & r' \\ g'_x & g'_y & g' \\ b'_x & b'_y & b' \end{vmatrix}, \quad (46)$$

где D — тот же определитель, что и написанный выше для системы уравнений (40). Этот определитель является математической основой всего преобразования, так как он построен из девяти коэффициентов, задающих положение одних первичных цветов относительно других. Если бы D был равен нулю, то преобразование (46) стало бы невозможным. Отличие D от нуля указывает на то, что объем тетраэдра ox , oy , oz не равен нулю, т. е. векторы ox , oy и oz не компланарны, другими словами, цвета X , Y , Z — линейно не-

зависимы. Наоборот, невозможность осуществить преобразование (46) в случае $D=0$ физически истолковывается как невозможность построить колориметрическое описание, используя линейно зависящие цвета.

Для вычисления относительных цветовых коэффициентов x , y и z надо выражения (46) подставить в

$$x = \frac{x'}{x'+y'+z'}; \quad y = \frac{y'}{x'+y'+z'}; \quad z = \frac{z'}{x'+y'+z'};$$

служащие определением цветовых коэффициентов. При желании узнать цветовые коэффициенты r , g и b надо значения r' , g' и b' из (45) подставить в

$$r = \frac{r'}{r'+g'+b'}; \quad g = \frac{g'}{r'+g'+b'}; \quad b = \frac{b'}{r'+g'+b'},$$

чем и будет закончено решение поставленной задачи.

ЦВЕТОВОЙ ТОН И ЧИСТОТА ЦВЕТА

В этой, последней, главе мы будем говорить о другом способе изображения цветности, отличном от прежде использованного способа, находившего графическое воплощение в треугольнике Максвелла или в цветовом графике. Новый способ изображения цветности отличается от прежних примерно так же, как декартовы координаты (косоугольные в колориметрии) отличаются от полярных координат. Фактически мы уже раз воспользовались этим способом изображения, когда в главе шестой, решив задачу о цветности излучения в первичных R , G и B , захотели более наглядно представить себе, какая получилась цветность. Мы обратили тогда внимание, что точка, изображающая искомую цветность (точка M на рис. 15 и 16), лежит между равноинтенсивным белым цветом и спектральной цветностью (оранжевой), соответствующей длине волны 600 м μ . Отсюда было сделано заключение, что искомая цветность является смесью белого с оранжевым, причем в данном случае оранжевого гораздо меньше, чем белого, так как точка лежит очень близко к белому.

Примененное в этом случае рассуждение и является основным для создания новой системы описания цветности. Некоторый условный белый цвет берется за опорный (полюс новой, полярной системы). Через этот опорный цвет и искомую цветность проводится прямая до пересечения со спектральным локусом в точке λ . Все точки на прямой $E\lambda$ обладают одним и тем же цветовым тоном. Таким образом, этим термином обозначается угловая координата цветности. Положение точки M на линии данного цветового тона определяет так называемую «чистоту цвета» (радиальная координата). Чистоту цвета обозначают буквой p и принимают равной отношению яркости монохроматической составляющей цветности λ к яркости цвета M :

$$p = \frac{B_{\lambda}}{B_M} = \frac{B_{\lambda}}{B_{\lambda} + B_E},$$

где B_E — яркость опорного белого цвета.

Описанная система более наглядна, чем система трех первичных, однако расчет точнее и лучше совершается по описанной в главах VII и VIII системе X , Y , Z .

Для увеличения паглядности применения метода «цветовой тон и чистота цвета» МКО предложила три воспроизводимых источника белого цвета — так называемые источники *A*, *B* и *C* (равноинтенсивный белый цвет трудно воспроизводим). Каждый из этих источников соответствует некоторой определенной «цветовой температуре». Цветовой температурой данного источника называется температура раскаленного абсолютно черного тела, имеющего ту же цветность, что и данный источник.

Источник *A* соответствует условиям вечернего освещения. Его цветовая температура 2854° Кельвина. В качестве такого источника употребляются специально изготовленные лампы накаливания с строго установленной силой тока, при котором получается нужная цветность.

Источники *B* и *C* соответствуют условиям дневного освещения. При этом источник *B* соответствует цветности «желтоватых фаз дневного света» [2]. Он имеет цветовую температуру 4800° Кельвина. Источник *C* соответствует цветности «голубоватых фаз дневного света» [2]. Он имеет цветовую температуру в 500° Кельвина. Непосредственным накаливанием металлической нити нельзя получить такого свечения: все металлы плавятся при значительно более низкой температуре. Поэтому источники *B* и *C* получают, пропуская свет источника *A* через специально составленные фильтры. Эти фильтры представляют собой плоскопараллельные кюветки, заполняемые раствором, составленным по совершенно определенному рецепту [1] (он тоже утвержден МКО).

Переход от системы *X*, *Y*, *Z* к системе «цветовой тон и чистота цвета» производится при посредстве специально составленных диаграмм. На этих диаграммах в прямоугольной координатной системе *x*, *y* нанесен опорный источник (например, *A*), спектральный locus и два семейства линий: семейство прямых — линии одинакового цветового тона и семейство кривых — линии равной чистоты.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Гуревич, Цвет и его измерение, Изд-во АН СССР, М.—Л., 1950.
2. Н. Т. Федоров, Курс общего цветоведения, ОНГИ НКПТ СССР, 1935.
3. П. В. Шамаков, Основы цветного и объемного телевидения, Изд-во «Советское радио», М., 1945.
4. С. В. Кравков, Цветовое зрение, Изд-во АН СССР, М., 1951.
5. Ш. Фабри, Общее введение в фотометрию, ГТТИ, М.—Л., 1934.
6. Н. Т. Федоров, Современное состояние колориметрии, ГТТИ, М.—Л., 1933.

[1] и [2] — учебники колориметрии. На наш взгляд изложение в [1] следует для первого чтения предпочесть. В [3] поучительна связь колориметрии с телевидением. Физиологическая сторона цветного восприятия изложена в [4]. В [5] колориметрии отведено всего несколько страниц в конце книги. Но это — прекрасное изложение основ фотометрии. Интересующимся высшей метрикой рекомендуем обратиться к [6].

Во всех указанных источниках, как и в остальной литературе на русском языке, в вопросе терминологии нет единства. Комитет Технической Терминологии АН СССР попытался в этом вопросе установить единообразие и составил проект терминологии по светотехнике (Москва, 1955), которого, в основном, мы и придерживались.

Таблица 1

Спектральная чувствительность среднего глаза $v(\lambda)$

Длина волны (в μ)	$v(\lambda)$	Длина волны (в μ)	$v(\lambda)$	Длина волны (в μ)	$v(\lambda)$	Длина волны (в μ)	$v(\lambda)$
380	0.0000 4	410	0.0012 0	440	0.0230	470	0.0910
81	0.0000 4	11	0.0013 8	41	0.0243	71	0.0950
82	0.0000 5	12	0.0015 6	42	0.0257	72	0.0992
83	0.0000 5	13	0.0017 4	43	0.0270	73	0.1035
84	0.0000 6	14	0.0019 5	44	0.0284	74	0.1080
385	0.0000 6	415	0.0021 8	445	0.0298	475	0.1126
86	0.0000 7	16	0.0024 4	46	0.0313	76	0.1175
87	0.0000 8	17	0.0027 4	47	0.0329	77	0.1225
88	0.0000 9	18	0.0031 0	48	0.0345	78	0.1278
89	0.0001 0	19	0.0035 2	49	0.0362	79	0.1333
390	0.0001 2	420	0.0040 0	450	0.0380	480	0.1390
91	0.0001 4	21	0.0045 5	51	0.0399	81	0.1448
92	0.0001 5	22	0.0051 5	52	0.0418	82	0.1507
93	0.0001 7	23	0.0058 1	53	0.0438	83	0.1567
94	0.0001 9	24	0.0065 1	54	0.0459	84	0.1629
395	0.0002 2	425	0.0072 6	455	0.0480	485	0.1693
96	0.0002 4	26	0.0080 6	56	0.0502	86	0.1761
97	0.0002 7	27	0.0088 9	57	0.0525	87	0.1833
98	0.0003 1	28	0.0097 6	58	0.0549	88	0.1909
99	0.0003 5	29	0.0107 0	59	0.0574	89	0.1991
400	0.0004 0	430	0.0116	460	0.0600	490	0.2080
01	0.0004 5	31	0.0126	61	0.0627	91	0.2173
02	0.0004 9	32	0.0136	62	0.0654	92	0.2270
03	0.0005 4	33	0.0146	63	0.0681	93	0.2371
04	0.0005 9	34	0.0157	64	0.0709	94	0.2476
405	0.0006 4	435	0.0168	465	0.0739	495	0.2586
06	0.0007 1	36	0.0180	66	0.0769	96	0.2701
07	0.0008 0	37	0.0192	67	0.0802	97	0.2823
08	0.0009 0	38	0.0204	68	0.0836	98	0.2951
09	0.0010 4	39	0.0217	69	0.0872	99	0.3087

Таблица 1 (продолжение)

Длина волны (в м μ)	$\nu(\lambda)$	Длина волны (в м μ)	$\nu(\lambda)$	Длина волны (в м μ)	$\nu(\lambda)$	Длина волны (в м μ)	$\nu(\lambda)$
500	0.3230	535	0.9149	570	0.9520	605	0.5668
01	0.3382	36	0.9238	71	0.9455	06	0.5539
02	0.3544	37	0.9320	72	0.9386	07	0.5410
03	0.3714	38	0.9398	73	0.9313	08	0.5283
04	0.3890	39	0.9471	74	0.9235	09	0.5156
505	0.4073	540	0.9540	575	0.9154	610	0.5030
06	0.4259	41	0.9604	76	0.9069	11	0.4905
07	0.4450	42	0.9661	77	0.8981	12	0.4781
08	0.4642	43	0.9713	78	0.8890	13	0.4658
09	0.4836	44	0.9760	79	0.8796	14	0.4535
510	0.5030	545	0.9803	580	0.8700	615	0.4412
11	0.5229	46	0.9840	81	0.8600	16	0.4291
12	0.5436	47	0.9873	82	0.8496	17	0.4170
13	0.5648	48	0.9902	83	0.8388	18	0.4049
14	0.5865	49	0.9928	84	0.8277	19	0.3929
515	0.6083	550	0.9950	585	0.8163	620	0.3810
16	0.6299	51	0.9969	86	0.8046	21	0.3690
17	0.6511	52	0.9983	87	0.7928	22	0.3570
18	0.6717	53	0.9994	88	0.7809	23	0.3449
19	0.6914	54	1.0000	89	0.7690	24	0.3329
520	0.7100	555	1.0002	590	0.7570	625	0.3210
21	0.7277	56	1.0001	91	0.7449	26	0.3092
22	0.7449	57	0.9995	92	0.7327	27	0.2977
23	0.7615	58	0.9984	93	0.7202	28	0.2864
24	0.7776	59	0.9969	94	0.7076	29	0.2755
525	0.7932	560	0.9950	595	0.6949	630	0.2650
26	0.8082	61	0.9926	96	0.6822	31	0.2549
27	0.8225	62	0.9898	97	0.6694	32	0.2450
28	0.8363	63	0.9865	98	0.6565	33	0.2354
29	0.8495	64	0.9828	99	0.6437	34	0.2261
530	0.8620	565	0.9786	600	0.6310	635	0.2170
31	0.8739	66	0.9741	01	0.6183	36	0.2082
32	0.8851	67	0.9691	02	0.6054	37	0.1996
33	0.8956	68	0.9638	03	0.5926	38	0.1912
34	0.9056	69	0.9581	04	0.5797	39	0.1830

Таблица 1 (продолжение)

Длина волны (в м μ)	$v(\lambda)$	Длина волны (в м μ)	$v(\lambda)$	Длина волны (в м μ)	$v(\lambda)$	Длина волны (в м μ)	$v(\lambda)$
640	0.1750	675	0.0232	710	0.0021 0	745	0.0001 7
41	0.1672	76	0.0219	11	0.0019 5	46	0.0001 6
42	0.1596	77	0.0206	12	0.0018 2	47	0.0001 5
43	0.1523	78	0.0194	13	0.0017 0	48	0.0001 4
44	0.1452	79	0.0182	14	0.0015 9	49	0.0001 3
645	0.1382	680	0.0170	715	0.0014 8	750	0.0001 2
46	0.1316	81	0.0158	16	0.0013 9	51	0.0001 1
47	0.1251	82	0.0148	17	0.0013 0	52	0.0001 0
48	0.1188	83	0.0138	18	0.0012 1	53	0.0001 0
49	0.1128	84	0.0128	19	0.0011 3	54	0.0000 9
650	0.1070	685	0.0119	720	0.0010 5	755	0.0000 8
51	0.1014	86	0.0111	21	0.0009 7	56	0.0000 8
52	0.0961	87	0.0103	22	0.0009 1	57	0.0000 7
53	0.0911	88	0.0095 6	23	0.0008 4	58	0.0000 7
54	0.0862	89	0.0088 6	24	0.0007 9	59	0.0000 6
655	0.0816	690	0.0082 0	725	0.0007 4	760	0.0000 6
56	0.0771	91	0.0075 9	26	0.0006 9	61	0.0000 6
57	0.0729	92	0.0070 5	27	0.0006 4	62	0.0000 5
58	0.0688	93	0.0065 6	28	0.0006 0	63	0.0000 5
59	0.0648	94	0.0061 2	29	0.0005 6	64	0.0000 5
660	0.0610	695	0.0057 3	730	0.0005 2	765	0.0000 4
61	0.0574	96	0.0053 6	31	0.0004 8	66	0.0000 4
62	0.0539	97	0.0050 3	32	0.0004 5	67	0.0000 4
63	0.0506	98	0.0047 1	33	0.0004 2	68	0.0000 3
64	0.0475	99	0.0044 0	34	0.0003 9	69	0.0000 3
665	0.0446	700	0.0041 0	735	0.0003 6	770	0.0000 3
66	0.0418	01	0.0038 1	36	0.0003 4		
67	0.0391	02	0.0035 5	37	0.0003 1		
68	0.0366	03	0.0033 2	38	0.0002 9		
69	0.0343	04	0.0031 0	39	0.0002 7		
670	0.0320	705	0.0029 1	740	0.0002 5		
71	0.0299	06	0.0027 3	41	0.0002 3		
72	0.0280	07	0.0025 6	42	0.0002 1		
73	0.0263	08	0.0024 1	43	0.0002 0		
74	0.0247	09	0.0022 5	44	0.0001 8		

Таблица 2

λ м μ	760—620	620—590	590—560	560—539	539—500	500—470	470—430	430—390
Цветность	Красный	Оранжевый	Желтый	Желто- зеленый	Зеленый	Голубой	Синий	Фиолетовый

Таблица 3

Цветовые характеристики среднего наблюдателя в системе R, G, B

Относительные коэффициенты			Длина волны (в μ)	Удельные координаты		
r	g	b		\bar{r}	\bar{g}	\bar{b}
0.0272	-0.0115	0.9843	380	0.0003	-0.00001	0.00117
0.0268	-0.0114	0.9846	385	0.00005	-0.00002	0.00189
0.0263	-0.0114	0.9851	390	0.00010	-0.00004	0.00359
0.0256	-0.0113	0.9857	395	0.00017	-0.00007	0.00647
0.0247	-0.0112	0.9865	400	0.00030	-0.00014	0.01214
0.0237	-0.0111	0.9874	405	0.00047	-0.00022	0.01969
0.0225	-0.0109	0.9884	410	0.00084	-0.00041	0.03707
0.0207	-0.0104	0.9897	415	0.00139	-0.00070	0.06637
0.0181	-0.0094	0.9913	420	0.00211	-0.00110	0.11541
0.0142	-0.0076	0.9934	425	0.00266	-0.00143	0.18575
0.0088	-0.0048	0.9960	430	0.00218	-0.00119	0.24769
0.0012	-0.0007	0.9995	435	0.00036	-0.00021	0.29012
-0.0084	0.0048	1.0036	440	-0.00261	0.00149	0.31228
-0.0213	0.0120	1.0093	445	-0.00673	0.00379	0.31860
-0.0390	0.0218	1.0172	450	-0.01213	0.00678	0.31670
-0.0618	0.0345	1.0273	455	-0.01874	0.01046	0.31166
-0.0909	0.0517	1.0392	460	-0.02608	0.01485	0.29821
-0.1281	0.0762	1.0519	465	-0.03324	0.01977	0.27295
-0.1821	0.1175	1.0646	470	-0.03933	0.02538	0.22991
-0.2584	0.1840	1.0744	475	-0.04471	0.03183	0.18592
-0.3667	0.2906	1.0761	480	-0.04939	0.03914	0.14494
-0.5200	0.4568	1.0632	485	-0.05364	0.04713	0.10968
-0.7150	0.6996	1.0154	490	-0.05814	0.05689	0.08257
-0.9459	1.0247	0.9212	495	-0.06414	0.06948	0.06246
-1.1685	1.3905	0.7780	500	-0.07173	0.08536	0.04776
-1.3182	1.7195	0.5987	505	-0.08120	0.10593	0.03688
-1.3371	1.9318	0.4053	510	-0.08901	0.12860	0.02698
-1.2076	1.9699	0.2377	515	-0.09356	0.15262	0.01842
-0.9830	1.8534	0.1296	520	-0.09264	0.17468	0.01221
-0.7386	1.6662	0.0724	525	-0.08473	0.19113	0.00830
-0.5159	1.4761	0.0398	530	-0.07101	0.20317	0.00549
-0.3304	1.3105	0.0199	535	-0.05316	0.21083	0.00320
-0.1707	1.1628	0.0079	540	-0.03152	0.21466	0.00146
-0.0293	1.0282	0.0011	545	-0.00613	0.21487	0.00023
0.0974	0.9051	-0.0025	550	0.02279	0.21178	-0.00058
0.2121	0.7919	-0.0040	555	0.05514	0.20588	-0.00105
0.3164	0.6881	-0.0045	560	0.09060	0.19702	-0.00130
0.4112	0.5932	-0.0044	565	0.12840	0.17522	-0.00138
0.4973	0.5067	-0.0040	570	0.16768	0.18087	-0.00135
0.5751	0.4283	-0.0034	575	0.20715	0.15429	-0.00123
0.6449	0.3579	-0.0028	580	0.24526	0.13610	-0.00108

Яркостные коэффициенты $L_R : L_G : L_B = 1 : 4.5907 : 0.0601$.

Таблица 3 (продолжение)

Относительные коэффициенты			Длина волны (в м μ)	Удельные координаты		
r	g	b		\bar{r}	\bar{g}	\bar{b}
0.6449	0.3579	—0.0028	580	0.24526	0.13610	—0.00108
0.7071	0.2952	0.0023	585	0.27989	0.11686	—0.00093
0.7617	0.2402	—0.0019	590	0.30928	0.09754	—0.00079
0.8087	0.1928	—0.0015	595	0.33184	0.07909	—0.00063
0.8475	0.1537	—0.0012	600	0.34429	0.06246	—0.00049
0.8800	0.1209	—0.0009	605	0.34756	0.04776	—0.00038
0.9059	0.0949	—0.0008	610	0.33971	0.03557	—0.00030
0.9265	0.0741	—0.0006	615	0.32265	0.02583	—0.00022
0.9425	0.0580	—0.0005	620	0.29708	0.01828	—0.00015
0.9550	0.0454	0.0004	625	0.26348	0.01253	—0.00011
0.9649	0.0354	0.0003	630	0.22677	0.00833	—0.00008
0.9730	0.0272	—0.0002	635	0.19233	0.00537	—0.00005
0.9797	0.0205	—0.0002	640	0.15968	0.00334	—0.00003
0.9850	0.0152	—0.0002	645	0.12905	0.00199	—0.00002
0.9888	0.0113	—0.0001	650	0.10167	0.00116	—0.00001
0.9918	0.0083	—0.0001	655	0.07857	0.00066	—0.00001
0.9940	0.0061	0.0001	660	0.05932	0.00037	0.00000
0.9954	0.0047	—0.0001	665	0.04366	0.00021	0.00000
0.9966	0.0035	0.0001	670	0.03149	0.00011	0.00000
0.9975	0.0025	0.0000	675	0.02294	0.00006	0.00000
0.9984	0.0016	0.0000	680	0.01687	0.00003	0.00000
0.9991	0.0009	0.0000	685	0.01187	0.00001	0.00000
0.9996	0.0004	0.0000	690	0.00819	0.00000	0.00000
0.9999	0.0001	0.0000	695	0.00572	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	700	0.00410	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	705	0.00291	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	710	0.00210	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	715	0.00148	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	720	0.00105	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	725	0.00074	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	730	0.00052	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	735	0.00036	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	740	0.00025	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	745	0.00017	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	750	0.00012	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	755	0.00008	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	760	0.00006	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	765	0.00004	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	770	0.00003	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	775	0.00001	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	780	0.00000	0.00000	0.00000

Таблица 4

Цветовые характеристики среднего наблюдателя в системе X, Y, Z

Относительные коэффициенты			Длина волны (в мμ)	Удельные координаты		
x	y	z		\bar{x}	y	\bar{z}
0.1741	0.0050	0.8209	380	0.0014	0.0000	0.0065
0.1740	0.0050	0.8210	385	0.0022	0.0001	0.0105
0.1738	0.0049	0.8213	390	0.0042	0.0001	0.0201
0.1736	0.0049	0.8215	395	0.0076	0.0002	0.0362
0.1733	0.0048	0.8219	400	0.0143	0.0004	0.0679
0.1730	0.0048	0.8222	405	0.0232	0.0006	0.1102
0.1726	0.0048	0.8226	410	0.0435	0.0012	0.2074
0.1721	0.0048	0.8231	415	0.0776	0.0022	0.3713
0.1714	0.0051	0.8235	420	0.1344	0.0040	0.6456
0.1703	0.0058	0.8239	425	0.2148	0.0073	1.0391
0.1689	0.0069	0.8242	430	0.2839	0.0116	1.3856
0.1669	0.0086	0.8245	435	0.3285	0.0168	1.6230
0.1644	0.0109	0.8247	440	0.3483	0.0230	1.7471
0.1611	0.0138	0.8251	445	0.3481	0.0298	1.7826
0.1566	0.0177	0.8257	450	0.3362	0.0380	1.7721
0.1510	0.0227	0.8263	455	0.3187	0.0480	1.7441
0.1440	0.0297	0.8263	460	0.2908	0.0600	1.6692
0.1355	0.0399	0.8246	465	0.2511	0.0739	1.5281
0.1241	0.0578	0.8181	470	0.1954	0.0910	1.2876
0.1096	0.0868	0.8036	475	0.1421	0.1126	1.0419
0.0913	0.1327	0.7760	480	0.0956	0.1390	0.8130
0.0687	0.2007	0.7306	485	0.0780	0.1693	0.6162
0.0454	0.2950	0.6596	490	0.0320	0.2080	0.4652
0.0235	0.4127	0.5638	495	0.0147	0.2586	0.3533
0.0682	0.5384	0.4534	500	0.0049	0.3230	0.2720
0.0039	0.6548	0.3413	505	0.0024	0.4073	0.2123
0.0139	0.7502	0.2359	510	0.0093	0.5030	0.1582
0.0389	0.8120	0.1491	515	0.0291	0.6082	0.1117
0.0743	0.8338	0.0919	520	0.0633	0.7100	0.0782
0.1142	0.8262	0.0596	525	0.1096	0.7932	0.0573
0.1547	0.8059	0.0394	530	0.1655	0.8620	0.0422
0.1929	0.7816	0.0255	535	0.2257	0.9149	0.0298
0.2296	0.7543	0.0161	540	0.2904	0.9540	0.0203
0.2658	0.7243	0.0099	545	0.3597	0.9803	0.0134
0.3016	0.6923	0.0061	550	0.4334	0.9950	0.0087
0.3373	0.6589	0.0038	555	0.5121	1.0002	0.0057
0.3731	0.6245	0.0024	560	0.5945	0.9950	0.0039
0.4087	0.5896	0.0017	565	0.6784	0.9786	0.0027
0.4441	0.5547	0.0012	570	0.7621	0.9520	0.0021
0.4788	0.5202	0.0010	575	0.8425	0.9154	0.0018
0.5125	0.4866	0.0009	580	0.9163	0.8700	0.0017

Яркостные коэффициенты $L_X:L_Y:L_Z = 0:1:0$.

Таблица 4 (продолжение)

Относительные коэффициенты			Длина волны (в мц)	Удельные координаты		
x	y	z		x	y	z
0.5125	0.4866	0.0009	580	0.9163	0.8707	0.0017
0.5448	0.4544	0.0008	585	0.9786	0.8163	0.0014
0.5752	0.4242	0.0006	590	1.0263	0.7570	0.0011
0.6029	0.3935	0.0006	595	1.0567	0.6949	0.0010
0.6270	0.3725	0.0005	600	1.0622	0.6310	0.0008
0.6482	0.3514	0.0004	605	1.0456	0.5668	0.0006
0.6658	0.3340	0.0002	610	1.0026	0.5030	0.0003
0.6801	0.3197	0.0002	615	0.9384	0.4412	0.0002
0.6915	0.3083	0.0002	620	0.8544	0.3810	0.0002
0.7006	0.2993	0.0001	625	0.7514	0.3210	0.0001
0.7079	0.2920	0.0001	630	0.6424	0.2650	0.0000
0.7140	0.2859	0.0001	635	0.5419	0.2170	0.0000
0.7190	0.2809	0.0001	640	0.4479	0.1750	0.0000
0.7230	0.2770	0.0000	645	0.36 8	0.1382	0.0000
0.7260	0.2740	0.0000	650	0.2835	0.1070	0.0000
0.7283	0.2717	0.0000	655	0.2187	0.0816	0.0000
0.7300	0.2700	0.0000	660	0.1649	0.0610	0.0000
0.7311	0.2689	0.0000	665	0.1212	0.0446	0.0000
0.7320	0.2680	0.0000	670	0.0874	0.0320	0.0000
0.7327	0.2673	0.0000	675	0.0636	0.0232	0.0000
0.7334	0.2666	0.0000	680	0.0468	0.0170	0.0000
0.7340	0.2660	0.0000	685	0.0329	0.0119	0.0000
0.7344	0.2656	0.0000	690	0.0227	0.0082	0.0000
0.7346	0.2654	0.0000	695	0.0158	0.0057	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	700	0.0114	0.0041	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	705	0.0081	0.0029	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	710	0.0058	0.0021	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	715	0.0041	0.0015	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	720	0.0029	0.0010	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	725	0.0020	0.0007	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	730	0.0014	0.0005	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	735	0.0010	0.0004	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	740	0.0007	0.0003	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	745	0.0005	0.0002	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	750	0.0003	0.0001	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	755	0.0002	0.0001	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	760	0.0002	0.0001	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	765	0.0001	0.0000	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	770	0.0001	0.0000	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	775	0.0000	0.0000	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	780	0.0000	0.0000	0.0000

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

ОСНОВЫ КОЛОРИМЕТРИИ

Глава I. Фотометрические свойства тел	3
Глава II. Свойства глаза	9
Глава III. Цветовые уравнения	13
Глава IV. Графическое изображение цвета	20
Глава V. Удельные координаты	27
Глава VI. Пример расчета цвета	33
Глава VII. Система МКО (X, Y, Z)	38
Глава VIII. Переход от системы R, G, B к системе X, Y, Z , предложенной МКО	43
Глава IX. Цветовой тон и чистота цвета	49
Литература	51

С. Б. Враский

ОСНОВЫ КОЛОРИМЕТРИИ

Ответственный редактор *П. В. Шмаков*
Технический редактор *В. В. Гальчинская*
Корректор *З. В. Семенова*

Сдано в набор 10-VIII-1959. Подписано к печати 21-XI-1959. Печ. листов 4.
М-04719 Формат 60x92 1/16. Тираж 1000 экз. Цена 3 руб. Зак. 3637.

Типография ЛЭИС, г. Красное Село

О П Е Ч А Т К И

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
24	2 снизу	прямой BM	прямой BN
45	16 снизу	$R = x'_r X + y'_r Y + z'_r Z = -$ $-0,49000 X$	$R = x'_r X + y'_r Y + z'_r Z =$ $= 049000 X \dots$

Цена 3 р.

" 78808

Д1
14416

