

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

**по дисциплине
«Теория цвета и цветовоспроизведения»**

для студентов специальности 1-47 02 01 Технология полиграфических
производств

Составитель О. А. Новосельская

ВВЕДЕНИЕ В ДИСЦИПЛИНУ «ТЕОРИЯ ЦВЕТА И ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ»

Действие на органы зрения излучений, длины волн которых находятся в диапазоне 400—700 нм, приводит к возникновению зрительных ощущений. Эти ощущения различаются, количественно и качественно. Их количественная характеристика называется светлотой, качественная -цветностью. Физические свойства излучения — мощность и длина волны — тесно связаны со свойствами возбуждаемого им ощущения. С изменением мощности изменяется светлота, а с изменением длины волны — цветность. }

Первоначальное представление о светлоте и цветности можно проиллюстрировать, поместив окрашенную поверхность частично на прямой солнечный свет, а частично — в тень. Обе части ее имеют одинаковую цветность, но разную светлоту.

Совокупность этих характеристик обозначается термином «цвет».

В связи с ролью цветовых ощущений в жизни и деятельности человека возникла наука о цвете — теория цвета, или цветоведение. Она изучает круг вопросов, связанных с оптикой и физиологией зрения, психологией восприятия цвета, а также теоретические основы и технику измерения и воспроизведения цветов.

Так как причиной возникновения цветового ощущения является действие света, то один из разделов теории цвета— физика цвета — рассматривает свойства света, главным образом распределение светового потока по спектрам испускания и отражения, а также способы получения этих спектров, аппаратуру и приемники излучения.

Действие излучений на глаз, причины возникновения светового ощущения, зрительный аппарат и его работа -содержание части, называемой физиологией цвета.

Соотношения между физическими характеристиками излучения и ощущениями, вызываемыми действием излучений, — предмет психологии цвета.

Метрология цвета — раздел теории цвета, изучающий методы измерения цвета. Метрология устанавливает способы численного выражения цветов, основы их классификации, методы установления цветовых допусков.

Закономерности, найденные физикой, физиологией, психологией и метрологией цвета, используются в теории воспроизведения цветного объекта. Она служит основой техники получения цветных изображений в полиграфии, кинематографии и телевидении.

Хотя теория цвета широко применяет достижения смежных областей знания, она пользуется собственными методами исследования, оригинальными и специфическими и поэтому является самостоятельной наукой.

Природа цветового ощущения

Характер цветового ощущения связан со спектральным составом действующего на глаз света и со свойствами зрительного аппарата человека.

Влияние спектрального состава следует из таблицы, в которой цвета излу-

чений сопоставлены с занимаемыми ими спектральными интервалами.

Фиолетовый 400—450 нм Синий 450—480 нм Голубой 480—510 нм Зеленый 510—565 нм Желтый 565—580 нм Оранжевый 580—620 нм Красный 620—700 нм

Вместе с тем задача оценки цвета не решается простым измерением распределения энергии излучения по спектру, как можно предположить на основании таблицы. По интервалу, занимаемому излучением, цвет можно указать вполне однозначно: если тело излучает или отражает в пределах 565—580 нм, то цвет его всегда желтый. Однако обратное заключение верно не всегда: по известному цвету излучения невозможно уверенно указать его спектральный состав или длину волны. Например, если излучение желтое, то это не значит, что оно занимает названный интервал или его часть. Желтой выглядит и смесь монохроматических излучений, находящихся вне этого интервала: зеленого ($\lambda_1 = 546$ нм) с красным ($\lambda_2 = 700$ нм) при определенных соотношениях их мощностей. В общем случае видимое тождество световых пучков не гарантирует их тождества по спектральному составу. Неразличимые же по цвету пучки могут иметь как одинаковый состав, так и разный. В первом случае их цвета называются изомерными, во втором — метамерными.

Практика воспроизведения цветных объектов требует получения цвета, зрительно неотличимого от воспроизводимого. При этом не имеет значения, метамерны или изомерны оригинальный цвет и цвет-копия. Отсюда возникает потребность воспроизводить и измерять цвет, независимо от спектрального состава излучения, вызывающего данное цветовое ощущение. Для специалиста, использующего или воспроизводящего цвет, безразличен спектральный состав света, отражаемого образцом. Для него существенно, чтобы копия была действительно, например, желтой, как образец, а не желто-зеленой или желто-оранжевой.

Теория цветового зрения объясняет, почему участок спектра, находящийся в пределах 400—700 нм, оказывает световое действие и по какой причине мы видим излучения в диапазоне 400—450 нм фиолетовыми, 450—480 — синими и т. д. Сущность теории состоит в том, что светочувствительные нервные окончания, находящиеся в одной из оболочек глаза и называемые фоторецепторами, реагируют только на излучения видимой части спектра. Глаз содержит три группы рецепторов, из которых одна наиболее чувствительна к интервалу 400—500 нм, другая — 500—600 нм, третья — 600—700 нм. Рецепторы реагируют на излучения в соответствии с их спектральной чувствительностью, и ощущения всех цветов возникают в результате комбинации трех реакций.

ЗРИТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ И ЦВЕТОВОЕ ЗРЕНИЕ

Общие сведения о зрительном аппарате

Орган зрения в целом состоит из трех отделов — периферического (собственно глаз), проводникового (зрительный нерв) и центрального (зрительная зона коры головного мозга в затылочной области).

Рассмотрим в общих чертах строение глаза, опуская детали, имеющие для теории цвета второстепенное значение.

Глазная линза — хрусталик — дает оптическое изображение наблюдаемого предмета, которое системой нервных окончаний, находящихся в одной из оболочек глаза, преобразуется в сигналы. Они по зрительному нерву передаются в затылочные доли головного мозга. В результате этого по неизвестным пока механизмам возникает зрительный образ предмета.

На рис. 2.1 схематически показан разрез глаза. Он представляет собой шарообразное тело, образованное несколькими оболочками. Внешняя 1, называемая белковой оболочкой или склерой, состоит из сухожилий, непрозрачна и выполняет защитную роль. Спереди она переходит в прозрачную и более выпуклую оболочку 2 — роговую. Под склерой находится сосудистая оболочка 3, в которой заключены кровеносные сосуды, питающие глаз. К ней по внутренней стороне примыкает пигментный слой клеток (на рисунке совпадает с внутренним контуром разреза сосудистой оболочки). Клетки поглощают рассеянный свет. Пигментный слой предохраняет оптическое изображение, создаваемое глазной линзой — хрусталиком 6, от чрезмерного искажения рассеянным светом. Сосудистая оболочка спереди переходит в ресничное (цилиарное) тело 4, а затем — в радужную оболочку 5, или радужку, содержащую пигментные клетки. Пространство между хрусталиком 6 и роговой оболочкой (передняя камера 7) заполнено так называемой водянистой влагой. Она преимущественно состоит из воды (99%), в которой растворены соли и белки. За хрусталиком находится стекловидное тело 8, также состоящее главным образом из воды.

Отверстие в центре радужки — зрачок — играет роль диафрагмы. При изменении светового потока, попадающего в глаз, площадь зрачка меняется: либо круговые мышцы радужки сужают его, либо радиальные расширяют. Эти реакции (зрачковый рефлекс) произвольны, и их роль заключается в предохранении светочувствительной оболочки глаза — сетчатки от чрезмерного раздражения при повышении освещенности. При ее снижении зрачковый рефлекс обеспечивает достаточную чувствительность оболочки.

Если в оптических приборах наводка на резкость осуществляется изменением расстояния от объектива до оптического изображения, то в органе зрения аналогичный процесс происходит путем изменения оптической силы хрусталика, определяемой кривизной его поверхностей. Кривизной управляют мышцы ресничного тела 4, находящегося в основании радужной оболочки. При сокращении круговых мышц уменьшается натяжение связок 9 хрусталика, называемых цинновыми. Тогда упругий хрусталик принимает естественную для него выпуклую форму, фокусное расстояние уменьшается и

близкий предмет изображается резко. Если же предмет удален, круговые мышцы ресничного тела расслабляются, а радиальные сокращаются. В результате этого хрусталик становится менее выпуклым и его фокусное расстояние возрастает. Эти явления получили название аккомодации.

Сетчаткой (ретиной, или сетчатой оболочкой) называется внутренняя оболочка *10*. Это — светочувствительный слой глаза. В сетчатке находятся нервные окончания (рецепторы) в которых происходят начальные преобразования лучистой энергии, приводящие в конце концов к возникновению светового ощущения.

Из глаза выходит зрительный нерв *11*, по которому нервные импульсы, возникающие вследствие обратимого фотораспада веществ, находящихся в рецепторах, передаются в мозг. Место выхода зрительного нерва — слепое пятно *12*—участок, не содержащий рецепторов.

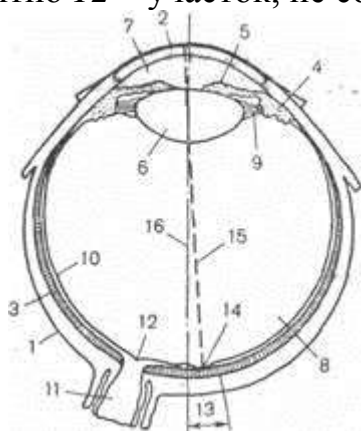


Рис. 2.1. Схема строения глаза:

1 — склера; 2 — роговица; 3 — сосудистая оболочка; 4 — ресничное тело; 5 — радужная оболочка; 6 — хрусталик; 7 — передняя камера; 8 — стекловидное тело; 9 — цинно-вы связки; 10 — сетчатка; 11 — зрительный нерв; 12 — слепое пятно; 13 — желтое пятно; 14 — центральная ямка; 15 — зрительная ось; 16 — оптическая ось

Наиболее важная с точки зрения цветовосприятия область сетчатки -- желтое пятно *13* (рис. 2.1), расположенное в центральной ее части. Оно окрашено желтым пигментом, предохраняющим рецепторы этой области от чрезмерного возбуждения коротковолновыми излучениями. Средняя часть *14* желтого пятна углублена и называется поэтому центральной ямкой. В середине центральной ямки находится область, содержащая только колбочки. Она имеет угловой размер около 2° , что соответствует площади меньше 1 мм^2 . Здесь насчитывается около 50 тыс. колбочек, очень близко расположенных друг к другу. Высокая поверхностная концентрация рецепторов обеспечивает большую разрешающую способность и цветовую чувствительность этого участка сетчатки.

При наблюдении детали предмета глаз ориентируется так, чтобы ее изображение упало на середину ямки. Такая ориентация обеспечивает наилучшее восприятие. Прямая, соединяющая центр ямки с наблюдаемой точкой предмета, как говорят, точкой фиксации взора, называется зрительной осью *15*. При рассмотрении предмета в целом глаз движется. Он принимает разные

положения, и оптические изображения деталей объекта, привлекающих внимание наблюдателя, поочередно проецируются на центральный участок ямки. Глаз «ощупывает» им наблюдаемый предмет. Вследствие подвижности глаза, наблюдатель не испытывает неудобств от того, что наиболее полезный участок сетчатки очень мал. В тех случаях, когда при исследованиях или измерениях хотят, чтобы работал только центральный участок ямки, угол зрения ограничивают соответствующим образом.

С удалением от средней части центральной ямки растет концентрация палочек и падает количество колбочек, приходящихся на единицу площади сетчатки. Изображение, образующееся на периферической ее части, не дает подробной информации об объекте. Оно позволяет лишь ориентироваться в пространстве.

Световая чувствительность палочек и колбочек резко различна. Палочки работают при низких освещенностях и выключаются при высоких. Эти рецепторы обеспечивают так называемое сумеречное зрение, когда освещенности невелики. В полутьме не различаются цвета, плохо видны детали. Это объясняется тем, что палочки располагаются на сетчатке значительно реже, чем колбочки, и разрешающая способность палочкового аппарата намного ниже - чем колбочкового. Однако в сумерках человек может ориентироваться, получая общее представление о предметах внешнего мира.

Колбочковое зрение называется дневным. При высоких освещенностях, когда начинают действовать колбочки, глаз различает цвета и мелкие детали объектов.

При некоторых средних освещенностях (так называемых промежуточных), когда яркости окружающих предметов находятся в пределах $0,01 — 10 \text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$, палочки и колбочки работают совместно.

В результате светового возбуждения палочек или колбочек в мозг передаются электрические импульсы, частота которых увеличивается с ростом освещенности сетчатки. Импульсы достигают затылочных долей мозга, где возбуждают световые ощущения, из которых складывается зрительный образ объекта.

Световая и спектральная чувствительность глаза

Общие сведения о чувствительности глаза. Под чувствительностью системы или приемника излучения подразумевается их свойство реагировать на излучение. Мера этого свойства, т. е. количественное выражение чувствительности, связана с реакцией приемника на поглощенную световую энергию. Количественно чувствительность выражается как величина, обратная мощности излучения, вызывающей определенную реакцию. Например, чувствительность фотоэлемента определяют как величину, обратную потоку излучения, вызывающему появление фототока. Чувствительность фотопленки есть величина, обратная экспозиции, дающей определенное почернение.

Следовательно, в общем случае чувствительность глаза S определяется как:

$$S = \frac{1}{P_3}, \quad (2.1)$$

где P_3 — мощность излучения, вызывающая заранее обусловленный зрительный эффект.

Чувствительность, рассчитанная по формуле (2.1), называется абсолютной. В некоторых случаях бывает достаточно выразить чувствительность глаза долей наибольшего значения абсолютной. Эта доля называется относительной чувствительностью. Указанной долей измеряют значения спектральной чувствительности (см. с. 15).

Реакции зрительной системы на излучения могут быть разными. В соответствии с этим различают несколько „типов чувствительности глаза: световую, спектральную, контрастную, чувствительность к цветовому тону, к насыщенности.

Остановимся на световой и спектральной чувствительности, а остальные типы рассмотрим позднее, после введения понятия о порогах цветоразличения.

Световая чувствительность. Способность глаза реагировать на возможно малый поток излучения называется световой чувствительностью. Она измеряется как величина, обратная пороговой яркости. Пороговой называется та наименьшая яркость объекта, например светового пятна, при которой оно может быть обнаружено с достаточной вероятностью на абсолютно черном фоне (т. е. $B_{\text{фона}} = 0$). Вероятность обнаружения зависит не только от яркости объекта, но и от угла зрения, под которым он рассматривается, или, как говорят, от его углового размера. С возрастанием углового размера растет число рецепторов, на которые проецируется пятно. Практически, однако, с увеличением угла зрения более чем на 50° чувствительность глаза перестает изменяться.

В соответствии с этим световая чувствительность S_n определяется как величина, обратная пороговой яркости B_n , при условии, что угол зрения $\alpha \geq 50^\circ$:

$$S_n = \left(\frac{1}{B_n} \right)_{\alpha \geq 50^\circ}, \quad (2.2)$$

Световая чувствительность очень велика. Так, для отдельных наблюдателей минимум энергии, необходимый для появления зрительного эффекта, составляет 3–4 кванта. Это значит, что в благоприятных условиях палочковая световая чувствительность глаза близка к предельной.

Колбочковая световая чувствительность, обеспечивающая цветовые ощущения, намного ниже «ахроматической», палочковой. Для возбуждения колбочкового зрения необходимо, чтобы на одну колбочку в среднем упало не менее 100 квантов.

Глаз по-разному воспринимает излучения различных длин волн. Это различие имеет как качественный, так и количественный характер. Качественное различие заключается в зависимости цвета (цветового тона) излучения от длины волны. При увеличении длины волны, т. е. при перемещении по спек-

тру, цветовой тон излучения изменяется от фиолетового до красного.

Количественная разница заключается в различной чувствительности глаза к излучениям различных длин волн. Эти излучения при одинаковой мощности вызывают в глазу различные по уровню реакции, т. е. имеют для глаза различные светлоты.

Спектральную чувствительность глаза принято выражать в относительных единицах видности v_λ .

$$v_\lambda = S_\lambda / S_{\lambda_{\max}},$$

где S_λ – спектральная чувствительность глаза к излучению с длиной волны λ ;

$S_{\lambda_{\max}}$ – максимальная чувствительность глаза.

Зависимость v_λ от λ называют кривой видности (нарисовать). Оказалось, что кривая видности $v(\lambda)$ в значительной степени зависит от уровня яркости рассматриваемых объектов. Происходит это потому что спектральная чувствительность палочкового и колбочкового зрения неодинакова. Наиболее часто в практических расчетах используется кривая дневного зрения 1. Она определена для поля зрения 2° , что соответствует угловому размеру центральной ямки глаза, где расположены только колбочки. Максимум спектральной чувствительности этой кривой приходится на 555 нм и принимается за 1,00.

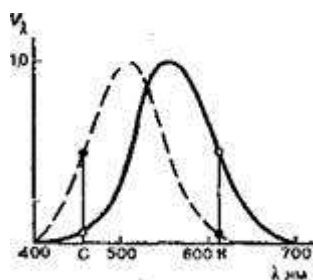


Рис. 1 Кривая видности

Ночью, когда действует только палочковое зрение, кривая видности смещается с 555 нм к 507 нм (кривая 2). При этом также изменяются соотношения яркостей цветных участков. Это заметил Пуркинье. Эффект Пуркинье заключается в том, что при уменьшении освещенности цветного объекта быстрее всего темнеют красные цвета и медленнее голубые. Красное и голубое изображения (мак и василек) днем одинаково яркие, ночью приобретают различную светлоту. Мак становится черным, а василек – серым. Эффект Пуркинье легко объяснить кривыми видности. Предположим, что голубая деталь отражает излучение с $\lambda = 475$ нм (сине-голубой), а красная – 650 нм. При одинаковой мощности этих излучений детали будут равнояркими. Ночью соотношение v_r/v_k изменится. При этом яркости деталей будут отличаться до 1000 раз.

Как видно из рисунка, кривые видности $v(\lambda)$ показывают резкий спад до 0,00 к длинам волн 400 и 780 нм, ограничивающим видимую область спектра. Эти границы обусловлены строением зрительного аппарата. Так в глазу предусмотрена защита рецепторов от высокоактивных инфракрасного, ультрафиолетового и фиолетового излучений. Они задерживаются хрусталиком, стекловидным телом, наполняющим глазное яблоко, и желтым пятном. В результате мы инфракрасное и ультрафиолетовое излучение не видим вообще,

а синий и фиолетовый цвета нам кажутся темными.

Адаптация и зрительная инерция

Чувствительность (световая, спектральная, контрастная и др.) зрительной системы не постоянна, а зависит от ряда факторов, из которых существенное значение имеет уровень освещенности.

Таблица 1. Освещенность в различных условиях освещения

Условия освещения	Среднее значение освещенности, лк
Земная поверхность ночью в полнолуние	0,2
То же в сумерках	1 — 50
в летний день в тени	6000 — 15 000
в летний день на солнце	50 000 — 150 000
в летний день при сплошной облачности	5000 — 25 000
Пол комнаты под лампой накаливания мощностью 100 Вт, висящей на высоте 3 м	20 — 30
Тротуар под уличным фонарем	1 — 6
Стол, освещаемый настольной лампой мощностью 100 Вт	80 — 200

Как видно из табл. 1, глаз сохраняет чувствительность при разных условиях освещения. Освещенность пейзажа, например при летнем солнце, в 4000 раз больше освещенности, создаваемой в комнате 100-ваттной лампой. Между тем глаз в обоих случаях хорошо различает детали объектов. Человек вполне удовлетворительно видит при освещенности в 1 лк, создаваемой ночью уличными фонарями, т. е. при освещенности в 100 000 раз меньшей, чем при ярком солнце. Глаз дает множество сведений и в полнолуние, когда освещенность почти в 1 000 000 раз ниже, чем при солнце. В безлунную ночь при свете звезд зрение позволяет человеку ориентироваться, хотя освещенность при этом в сотни миллионов раз ниже, чем на ярком солнце.

Ширина диапазона мощностей видимых излучений, могущих возбуждать световое ощущение, объясняется способностью глаза приспосабливаться к разным уровням яркостей, настраиваться на ее средний уровень.

Процесс приспосабливания глаза к изменению условий освещения вообще называется адаптацией (лат. *adapto* — приспосабливаю).

Приспособление к изменению средней освещенности или яркости называется яркостной адаптацией.

Кроме яркостной известна цветовая адаптация. Она состоит в том, что под влиянием предшествующего светового освещения, цветовое восприятие изменяется. Если, например, облучить сетчатку насыщенным красным, то белое поле в течение времени адаптации видится зеленым.

Изменение чувствительности глаза во времени, или, иначе, кинетику яркостной адаптации можно представить следующим образом (рис. 2 - раздать). Процесс увеличения чувствительности при переходе от большой яркости к малой называется темновой адаптацией (рис. 2, а), если глаз приспосабливается к большой яркости, — световой адаптацией. Из рисунка видно, что из-

менение чувствительности глаза продолжается довольно длительное время. Для темновой адаптации это 40—60 мин. Скорость световой адаптации зависит от яркости, на которую адаптируется глаз. Чувствительность падает тем быстрее, чем выше эта яркость. К большой яркости наблюдатель привыкает за 4—8 мин.

В основе яркостной адаптации лежат разные механизмы. Один из них называется зрачковым рефлексом. При уменьшении освещенности диаметр зрачка увеличивается от 2 мм на ярком свете до 10 мм в полутьме. Световой поток, поступающий в глаз, возрастает при этом в 25 раз, т. е. пропорционально площади зрачка. Соответственно этому увеличивается и чувствительность.

Более мощный механизм адаптации заключается в двойственности световоспринимающей системы глаза. Палочки позволяют отличить белую поверхность от черной при освещенности 10^{-6} лк, если глаз адаптирован к такой низкой освещенности. Чувствительность же колбочек гораздо ниже.

По мере роста освещенности палочковый механизм постепенно выключается. При освещенностях выше 10^{-2} лк зрение становится чисто колбочковым.

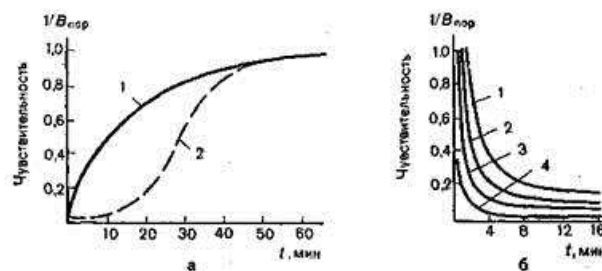


Рис. 2. Кинетика яркостной адаптации:

а — темновая адаптация (1 — если исходная яркость велика; 2 — малая предадаптационная яркость — исходная яркость мала); *б* — световая адаптация (цифры над кривыми указывают предадаптационные яркости в $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$)

В процессе цветовой адаптации изменяется цветовая чувствительность глаза. Механизм цветовой адаптации заключается в уменьшении концентрации зрительного пигмента в тех колбочках, которые особенно интенсивно работают при предадаптационном освещении. Так, в нашем примере цветовой адаптации происходит уменьшение концентрации пигмента в красночувствительных рецепторах. Вследствие этого при рассматривании белого поля будут работать главным образом зеленочувствительные и синечувствительные колбочки и глаз получит ощущение зелено-голубого. Это позволяет глазу приспособливаться к изменению цветовой температуры основного освещения.

Зрительный процесс в условиях изменяющейся чувствительности называется неустановившимся. В момент окончания адаптации чувствительность глаза становится постоянной, зрительный процесс при этом носит название установившегося. Все цветовые измерения и исследования проводятся в условиях установившегося зрения.

Большое влияние на зрительное ощущение оказывает также инерционность этого ощущения. Т. е. зрительное ощущение вызывается световым сиг-

налом не мгновенно, а через некоторое время после его начала, и, наоборот, световое ощущение продолжается и после сигнала. Свойство зрительной системы сохранять состояние покоя или работы в течение некоторого времени после начала или прекращения светового сигнала называется *зрительной инерцией*.

На рис. 3 (раздать) показан механизм зрительной инерции. Реакция глаза на постоянный по яркости световой сигнал (прямоугольный график) возникает не сразу, а через некоторое время Δt (кривая линия). На такое же время смещено и начало спада светового ощущения (светлоты). Кривая изменения светлоты во времени отчетливо делится на две части — одна описывает возрастание светлоты, а другая — ее спад в зависимости от времени. Обе части кривой по форме близки к экспоненте. Следствием зрительной инерции является слитное восприятие серии световых сигналов при их достаточно большой частоте. Если через достаточно малое время вслед за первым световым сигналом последует второй (пунктирные линии на рис. 3), то вызванное им ощущение в той или иной мере сольется с первым. Чем меньше промежуток времени, разделяющий сигналы, тем менее прерывисто световое ощущение. При некоторой частоте, когда падение светлоты ΔW не превосходит порогового значения, серия сигналов воспринимается как один непрерывный. Частота, обеспечивающая непрерывное зрительное восприятие прерывистых сигналов, называется критической частотой мелькания.

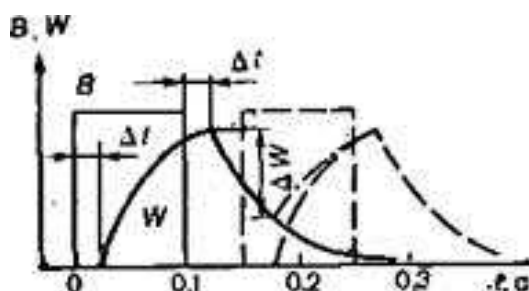


Рис. 3. Зрительная инерция: штрихпунктирная линия показывает сумму светлот, возникающих вследствие действия двух последовательных световых сигналов, разделенных малым промежутком времени

Вследствие инерции зрения зрительный образ сохраняется в сознании некоторое время после того, как прекратилось действие света. Этот образ называется последовательным. Его возникновение объясняется тем, что продукты фотораспада зрительного пигмента восстанавливаются не сразу после прекращения освещения и отрицательные ионы продолжают давать импульсы тока, приводящие к возникновению зрительного ощущения.

На зрительной инерции основана кинематография. Когда частота кадров равна или превышает критическую частоту мелькания, последовательные образы каждого из кадров сливаются в единое впечатление.

Вследствие зрительной инерции после прекращения освещения сохраняется не только ощущение светлоты, но и цветности.

ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТА

Колориметрия использует два способа количественного описания цветов.

1) Определение их цветовых координат и тем самым — строгих численных характеристик, по которым их можно не только описать, но и воспроизвести. Системы измерения цвета называются колориметрическими.

2) Нахождение в некотором наборе эталонных цветов образца, тождественного данному. Совокупность образцов составляет систему, называемую системой спецификации.

Для измерения цвета пользуются приборами, называемыми колориметрами, компараторами цвета, спектрофотометрами. Колориметрическое определение основано на том, что с помощью трех основных синтезируется цвет, тождественный измеряемому.

Результаты любых измерений должны быть однозначными и сопоставимыми. Это — одно из основных требований метрологии. Для его осуществления необходимо, чтобы условия измерения, от которых зависят их результаты, были постоянными, принятыми за норму. Совокупность нормированных условий измерения цвета составляет колориметрическую систему.

МЕТОДЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЦВЕТА

Синтез цвета

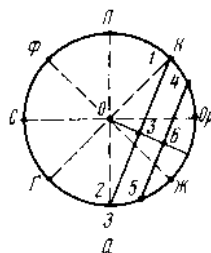
Если на глаз действует смесь излучений, то реакции рецепторов на каждое из них складываются. Смешение окрашенных световых пучков дает пучок нового цвета. Смесь красок или окрашенных жидкостей имеет также иной цвет, чем каждый из ее компонентов. Эффект получения нового цвета в результате смешения излучений или сред, например красок, получил название сложения цветов. Изучение закономерностей эффекта показало, что в основе эффектов смешения излучений и смешения сред лежат неодинаковые физические явления. Например, смесь желтой и синей красок дает зеленый цвет, а желтого и синего излучений — белый. Неодинаково влияет в этих случаях и изменение количества носителя цвета: при росте концентрации красок в смеси ее светлота падает, а при увеличении мощности излучений, наоборот, возрастает.

В связи с этим различают два типа сложения — аддитивное (смешение излучений) и субтрактивное (смешение сред). Названия связаны с тем, что при смешении излучений их действия складываются. Каждая из смешиваемых сред, наоборот, поглощает определенные излучения, вычитая их из светового пучка, направленного на смесь.

Получение заданного цвета сложением других называется его синтезом.

Аддитивный синтез используется главным образом при измерении цветов, а субтрактивный — при воспроизведении цветных оригиналов в цветной фотографии. Получение нового цвета из смеси аддитивного и субтрактивного синтезов получило название автотипного синтеза цвета, который широко используется в полиграфии.

Смешение цветов, пример:



ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СМЕШЕНИЯ ЦВЕТОВ:

1. Каждому хроматическому цвету соответствует другой хроматический, который при смешении с ним в определенной пропорции дает ахроматический цвет. Такие два цвета называются дополнительными.

2. При смешении дополнительных цветов не в той пропорции, которая необходима для получения ахроматического цвета получается хроматический цвет того же цветового тона, что и цвет, взятый в избыточном количестве.

3. При смешении недодополнительных цветов получаются цвета, промежуточные по цветовому тону между смешиваемыми. При этом чем ближе смешиваемые цвета друг к другу по цветовому тону, тем выше чистота образуемого цвета.

Аддитивный синтез цвета

Аддитивный синтез – это метод, при котором образование нового цвета происходит в результате оптического смешения двух или более световых потоков.

Получение нового цвета осуществляется не только при смешении излучений или красок, но и в ряде других случаев. Примером служит получение нового цвета при быстром чередовании окрашенных участков. Наблюдая вращающийся волчок, плоскость которого разделена на разноокрашенные секторы, наблюдатель видит новый цвет, отличный от цветов каждого из них. Сложение цветов в этом случае — результат зрительной инерции.

Еще один пример. Если на некотором изображении — рисунке или картине — размеры разноцветных штрихов или мелких пятен и расстояния между ними оказываются за пределами разрешающей способности глаза, то участок имеет иной цвет, чем штрихи: их цвета складываются. Иногда это явление объясняют произвольными движениями глаза (см. с. 12), и как следствие — сложением последовательных образов.

Чтобы провести аддитивный синтез, необходимо иметь красный, зеленый и синий световые пучки. Они могут быть взяты либо от источника, непосредственно испускающего окрашенные излучения (лазерные, газоразрядные монохроматические), либо от обычных тепловых излучателей (ламп накаливания), экранированных красным, зеленым и синим светофильтрами.

Цвета излучений, используемых для синтеза, и сами они называются основными. Количественные характеристики основных, например мощность или яркость, часто называются их количествами. Получение заданного цвета смешением основных, взятых в нужных количествах, называется его аддитивным синтезом.

Законы аддитивного синтеза цвета сформулированы Г. Грасманом (1853г.).

Первый закон Грасмана (трехмерности). Каждый цвет может быть выражен через три линейно независимых цвета, а количество триад линейно независимых цветов бесконечно велико. или Любой цвет однозначно выражается тремя, если они линейно независимы.

Линейная независимость заключается в том, что нельзя получить никакой из указанных трех цветов сложением двух остальных.

Закон утверждает возможность описания цвета с помощью цветковых уравнений.

Второй закон Грасмана (непрерывности). При непрерывном изменении излучения цвет изменяется также непрерывно.

Не существует такого цвета, к которому невозможно было бы подобрать бесконечно близкий.

Третий закон Грасмана (аддитивности). Цвет смеси излучений зависит только от их цветов, но не от спектрального состава.

т.е. если каждый из двух визуально одинаковых цветов смешивается с третьим, то независимо от того, каков спектральный состав этих двух цветов, результирующий цвет в обоих случаях будет одинаковым.

Из этого закона следует факт, имеющий первостепенное значение для тео-

рии цвета,— аддитивность цветовых уравнений: если цвета нескольких излучений описаны цветовыми уравнениями, то цвет аддитивной смеси выражается суммой этих уравнений. То есть, если

то

$$\begin{aligned}
 \mathcal{C}_1 &= K_1 K + \mathcal{Z}_1 \mathcal{Z} + C_1 \mathcal{C}, \\
 \mathcal{C}_2 &= K_2 K + \mathcal{Z}_2 \mathcal{Z} + C_2 \mathcal{C}, \\
 &\dots \dots \dots \\
 \mathcal{C}_n &= K_n K + \mathcal{Z}_n \mathcal{Z} + C_n \mathcal{C}, \\
 \mathcal{C} &= (K_1 K_2 + \dots + K_n) K + (\mathcal{Z}_1 + \mathcal{Z}_2 + \dots + \mathcal{Z}_n) \mathcal{Z} + \\
 &\quad + (C_1 + C_2 + \dots + C_n) \mathcal{C}. \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

Идеальный субтрактивный синтез

Часть излучения, проходящего через слой вещества, поглощается им. Иначе, слой вещества вычитает определенную долю из излучения, направленного на него. На этом основан субтрактивный, вычитательный, синтез. Этот способ сложения цветов осуществляется с помощью сред, называемых красками субтрактивного синтеза.

Красочный слой, регулирующий одно из основных излучений, может использоваться либо на просвет, либо в отраженном свете, т. е. наложенным на бумагу. В первом случае излучение проходит через краску один раз, а во втором — дважды: сначала проникает через краску к бумаге, отражается от нее и вновь выходит через красочный слой. Краска, наложенная на бумагу, уменьшает ее коэффициент отражения. Рассматривая систему «бумага—краска», принято говорить о коэффициенте отражения краски, хотя на самом деле отражает бумага.

Краски обладают свойством поглощать излучение одной из зон спектра — зоне поглощения — в той мере, в какой это требуют значения цветовых координат синтезируемого цвета, а излучения остальных зон — пропускать. Пропускание в зоне поглощения должно быть управляемым. Средством управления служит толщина красочного слоя. С уменьшением толщины пропускание возрастает, и наоборот. Полное пропускание в двух зонах спектра и управляемое поглощение в третьей дают возможность дозировать одно из зональных излучений — красное, зеленое или синее.

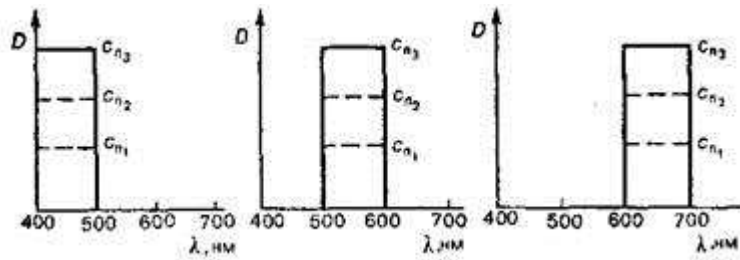
Связь поглощательной способности вещества с его концентрацией выражается законом Бугера—Ламберта—Бера, по которому монохроматическая оптическая плотность D_λ , пропорциональна концентрации:

$$D_\lambda = \chi_\lambda cl,$$

где χ_λ , — удельный показатель поглощения, зависящий от природы вещества; c — концентрация поглощающего вещества; l — толщина слоя вещества.

Произведение cl имеет размерность г/см² и называется поверхностной концентрацией. Обозначим ее c_n , тогда $D_\lambda = \chi_\lambda c_n$.

Из формулы видно, что монохроматическая оптическая плотность веществ, в том числе красок субтрактивного синтеза, пропорциональна их поверхностным концентрациям. Следовательно, с изменением этой величины кривая поглощения смещается.

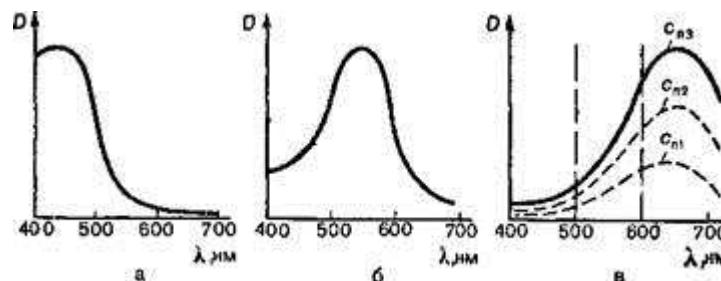


Изменение формы кривых поглощения идеальных красок при изменении их поверхностной концентрации

Цвет краски дополнителен цвету дозируемого ею излучения. Желтая поглощает в нужной для синтеза степени синее излучение. Зеленым излучением управляет пурпурная краска, а красным — голубая.

Реальный субтрактивный синтез

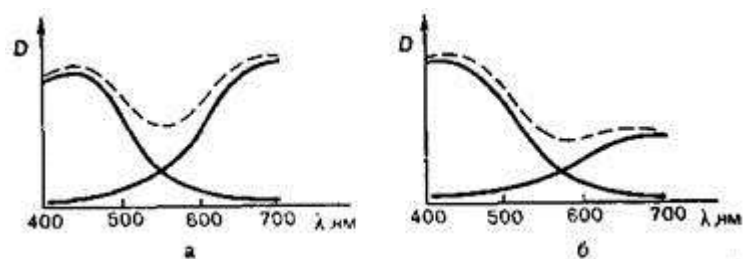
Красок, полностью поглощающих свет в одной зоне спектра, нет. Реально существующие среды лишь приближенно отвечают требованиям субтрактивного синтеза.



Кривые поглощения реальных красок субтрактивного синтеза; пунктиром показано изменение положения кривой голубой краски с изменением ее поверхностной концентрации

На рис. показана кривая поглощения голубой, реально существующей краски. Из рисунка видно, как происходит смещение кривой. С уменьшением c_n оптические плотности сильно уменьшаются только там, где они были большими. Там же, где они были незначительными, уменьшение концентрации мало влияет на их изменение. Поэтому для красок с отчетливо выраженной полосой поглощения изменение поверхностной концентрации — средство регулирования пропускания в этой полосе. Так как $\tau \sim 10^{-D}$, то изменение плотности значительно влияет на пропускание.

Однако процесс управления осложняется тем, что все объекты природы, в том числе и краски, имеют плавные кривые отражения или пропускания, распространенные на весь видимый спектр. Поэтому с изменением поверхностной концентрации изменяется оптическая плотность краски не только в той зоне, где хотят заданным образом изменить поглощение, но и в той (или в тех), где его изменять не требуется (рис. в, зеленая зона). Взяв в равных количествах голубую и желтую краски, можно рассчитывать на получение насыщенного зеленого цвета. Но вследствие плавного хода спектральных кривых смешение этих красок дает грязно-зеленый цвет: оптические плотности красок складываются, и суммарная кривая имеет вид, показанный на рис. а пунктиром. Точно так же смешение небольшого количества голубой краски с желтой, взятой в большой концентрации, дает не ожидаемый желто-оранжевый, а оранжево-красный цвет (рис.).



Результат синтеза зеленого (а) и желто-оранжевого (б) цветов реальными красками

Поглощение красок субтрактивного синтеза в тех зонах, где они по смыслу этого вида синтеза не должны поглощать, называется вредным. Оно неизбежно по природе реально существующих красок из-за плавности спектральных кривых и распространения поглощения на весь видимый спектр.

Поглощение красок в тех зонах, которыми они по смыслу процесса должны управлять, называется полезным.

Красок, обладающие только полезным поглощением называются идеальными красками или красками Гюбля — по имени предложившего их исследователя. Каждая идеальная краска управляет строго одной зоной спектра. Идеальным краскам придают и другие свойства, упрощающие изложение сущности субтрактивного синтеза: полагают, что они абсолютно не рассеивают свет и не взаимодействуют друг с другом.

В случае субтрактивного синтеза для количественного выражения цвета иногда пользуются субтрактивными координатами, позволяющими выразить цвет через количества красок, взятых для его синтеза. Удобнее, однако, и для характеристики субтрактивно получаемых цветов пользоваться обычными цветовыми уравнениями, предварительно рассчитав зональные коэффициенты пропускания красок.

Автотипный синтез

Автотипным называют получение нового цвета в результате как наложения красок (субтрактивного синтеза), так и за счет пространственного смешения их излучений (аддитивный синтез).

Одним из примеров аддитивного синтеза служили рядом расположенные окрашенные полосы, которые в результате удаления от наблюдателя давали новый цвет. В полиграфии широко использован этот прием. Растрирование изображения позволяет разделить его на множество микроточек, которые не заметны для рассмотрения с расстояния в 30 см. Окрашивание этих точек в краски субтрактивного синтеза позволяет получить множество новых оттенков.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Основные излучения выбираются так, чтобы они в соответствии с первым законом Грасмана были линейно независимыми. Этому требованию отвечают излучения синего, зеленого и красного цветов. Колориметрия предъявляет к основным не только требование линейной независимости, но и возможность легкого и точного их осуществления и также возможно большая насыщенность воспроизводимых триадой цветов.

Поэтому в 1931 г. на VIII сессии Международного комитета по освещению (МКО, CIE) за основные были приняты цвета следующих излучений:

красное $\lambda_R = 700$ нм, легко выделяется с помощью «крутого» красного светофильтра из спектра обычной лампы накаливания;

зеленое $\lambda_G = 546,1$ нм, линия *e* в спектре ртути;

синее $\lambda_B = 435,8$ нм, линия *g* в спектре ртути.

Цвета этих излучений получили название цветов R, G, B, а колориметрическая система, использующая их в качестве основных, — системы RGB.

Одновременно с триадой RGB была принята другая тройка основных. Ее составили воображаемые цвета, более насыщенные, чем спектральные. Поскольку таких сверхнасыщенных цветов в природе нет, их обозначили символами неизвестных величин X, Y и Z. Основанная на их применении колориметрическая система получила название XYZ.

Одна из причин, побудивших ввести воображаемые сверхнасыщенные цвета, состоит в стремлении избавиться от отрицательных цветовых координат, неизбежных в случае реальных цветов.

Рабочей колориметрической системой, в которой выражаются результаты измерения цвета, является XYZ, называемая международной, а RGB имеет значение вспомогательной, иногда контрольной.

Основные цвета XYZ описываются в системе RGB следующими уравнениями:

$$X = 0,4185 R - 0,0912 G + 0,0009 B;$$

$$Y = -0,1588 R + 0,2524 G - 0,0025 B;$$

$$Z = -0,0829 R + 0,0157 G + 0,1786 B.$$

Как видно из уравнений, цвет X близок по цветовому тону к R, хотя и заметно насыщеннее его ($-0,0912 G$). Цвет Y много насыщеннее G: в цветовом уравнении две отрицательных координаты. Цвет Z несколько голубее B и более насыщен ($-0,0829 R$).

Кривые сложения

Цветовые координаты можно определить не только измерением, но и рассчитать их по кривым отражения образца (или пропускания, если он прозрачен) и кривым сложения.

Кривыми сложения называются графики функций распределения по спектру цветовых координат монохроматических излучений, имеющих мощность, равную одному Вт. Такие координаты называются удельными, т. е. относящимися к единице мощности. Они обозначаются теми же буквами, что

и координаты цветности, но с чертой наверху. Удельные координаты находят измерением цветов монохроматических излучений произвольной мощности и последующим делением их координат на мощность:

$$\bar{r}_\lambda = \frac{R_\lambda}{\Phi_{0\lambda}}; \quad \bar{g}_\lambda = \frac{G_\lambda}{\Phi_{0\lambda}}; \quad \bar{b}_\lambda = \frac{B_\lambda}{\Phi_{0\lambda}}$$

Кривые сложения основных XYZ пересчитывают из экспериментально полученных $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$. Значения удельных координат приводятся в колориметрических справочниках, а кривые сложения показаны на рис.

Главная особенность кривых сложения x_{yz} состоит в том, что одна из них — y_λ — совпадает по форме и положению с кривой относительной световой эффективности (видности). Площади, ограниченные каждой из кривых и осями координат, одинаковы между собой. Кривые сложения включены в колориметрические и светотехнические справочники.

Цветовая модель CIE RGB

Трехмерность цвета дает основание выразить его в виде вектора в пространстве.

Выберем систему прямоугольных координат (рис. 6.1) и обозначим координатные оси символами основных цветов, например **RGB**. Отложим на осях числа, выражающие цветовые координаты. Положим для примера, что цвет Ц задан уравнением:

$$\text{Ц} = 4R + 3G + 2B. \quad (6.1)$$

В соответствии с уравнением проведем вектор Ц. Его проекции на координатные оси есть цветовые составляющие 4R, 3G, 2B.

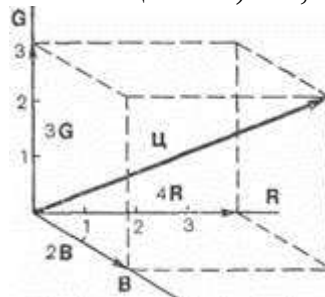


Рис. 6.1. Вектор цвета, описываемый уравнением (6.1), в пространстве RGB

Используя координатные оси, можно найти векторы любого цвета, получаемого с помощью выбранных основных.

Совокупность цветов, выраженная в данной системе основных, называется цветовым пространством системы. Каждой точке этого пространства соответствует определенный цвет, потому что любую точку можно рассматривать как конец вектора, проведенного из начала координат.

В соответствии с третьим законом Грасмана цветовые уравнения, как и обычные алгебраические, аддитивны: если складываются два цвета, то суммарный имеет цветовые координаты, равные сумме координат складываемых цветов. Следовательно, вектор суммарного цвета равен сумме векторов складываемых и может быть найден по правилу параллелограмма.

Весьма важен вопрос об изменении насыщенности и яркости в цветовом пространстве. Поскольку ахроматические цвета имеют равные цветовые координаты, то все они находятся в цветовом пространстве на линии, равноудаленной от координатных осей. Эта линия (ЧБ на рис. 6.2) называется ахроматической осью. Чем большие численные значения имеют цветовые координаты, тем больше яркости цветов. Точке М ахроматической оси соответствует малая яркость (темно-серый цвет), а точке N — большая (светло-серый). В начале координат лежит точка Ч нулевой яркости, выражающая черный цвет. По мере продвижения по ахроматической оси от начала координат яркость возрастает. Часть оси, изображенная на рисунке, кончается точкой Б, определяющей положение белого цвета в цветовом пространстве.

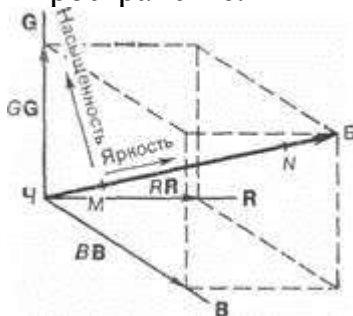


Рис. 6.2. Схема изменения характеристик цвета в зависимости от его положения в цветовом пространстве

Если цветовые координаты мало отличаются друг от друга, цвет, определяемый ими, находится вблизи ахроматической оси. Следовательно, насыщенность цвета в цветовом пространстве возрастает по мере удаления от ахроматической оси. Изменение насыщенности и яркости показано стрелками.

Цветовое пространство обладает некоторыми специфическими свойствами. Так, к нему неприменимо понятие расстояния, угла; в то же время можно говорить об отношениях длин и углов.

Особые плоскости и линии цветового пространства RGB

Плоскость единичных цветов. На координатных осях **RGB** отложим яркости единичных значений основных цветов: $B_R = B_G = B_B = 1$. Сумма цветовых координат (модуль) цвета, заданного любой точкой плоскости P , равна единице. Плоскость единичных цветов является плоскостью цветности. Треугольник, образованный пересечением плоскости единичных цветов с координатными плоскостями (рис. 6.3), называется треугольником цветности или цветовым треугольником. Любая точка треугольника цветности выражает единичный цвет, т. е. такой, сумма координат которого (т. е. модуль цвета) равна единице.

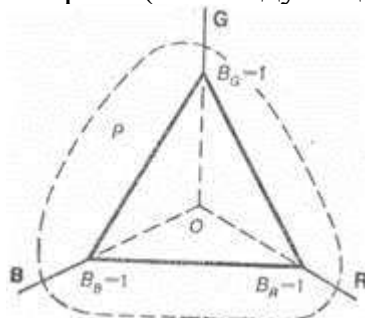


Рис. 6.3. Плоскость единичных цветов и треугольник цветности

Плоскости равных яркостей. Цвета, лежащие на плоскости единичных цветов, имеют одинаковые яркости, выражаемые в колориметрических единицах. Однако для их выражения в энергетических величинах необходимо знать реакцию глаза на действующее излучение, которая выражается кривыми основных возбуждений (рис.). Согласно кривой основных возбуждений, если принять относительное количество красного за единицу, то для получения белого цвета необходимо 4,59 таких же единиц зеленого и 0,06 синего. Эти количества приняты за единичные и называются яркостными коэффициентами L_R , L_G и L_B . Для перехода от световых к энергетическим величинам необходимо яркости цветов R, G и B выразить в яркостных единицах B_R , B_G и B_B через:

$$\begin{aligned} B_R &= 680 L_R = 680 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}; \\ B_G &= 680 L_G = 3121 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}; \\ B_B &= 680 L_B = 41 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Отложим на координатных осях **RGB** (рис. 6.4) точки S, T и U , имеющие яркости, равные $680 \text{ кд}/\text{м}^2$. $680 \text{ кд}/\text{м}^2$ составляют одну яркостную единицу B_R , $0,22$ единицы B_G и 17 единиц B_B .

Проведем через точки S, T и U плоскость Q_1 , называемую плоскостью равных яркостей. Каждая ее точка выражает цвет, яркость которого равна $680 \text{ кд}/\text{м}^2$.

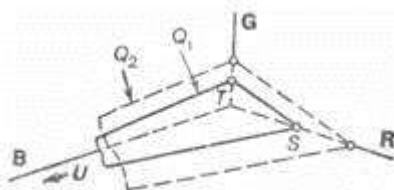


Рис. 6.4. Плоскости равных яркостей

Если отложить на осях координат не 680 , а, например, $1360 \text{ кд}/\text{м}^2$ и провести через отложенные точки плоскость Q_2 , то она окажется параллельной Q_1 . Следовательно, в цветовом пространстве **RGB** (как и в любом цветовом пространстве) находится семейство взаимно параллельных плоскостей равной яркости. Можно вообразить себе плоскость нулевых яркостей Q_0 . Она параллельна Q_1 и Q_2 и проходит через начало координат. В ней лежат точки безяркостных цветов. Линии пересечения плоскости единичных цветов с плоскостями равной яркости называются линиями равной яркости. Линия пересечения плоскости единичных цветов с плоскостью нулевой яркости называется алианой. На алиане лежат точки воображаемых цветов, не имеющих яркости. Представление о таких цветах используется в колориметрической системе XYZ.

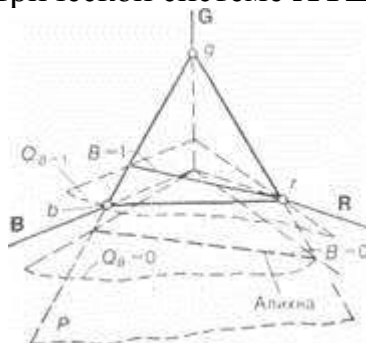
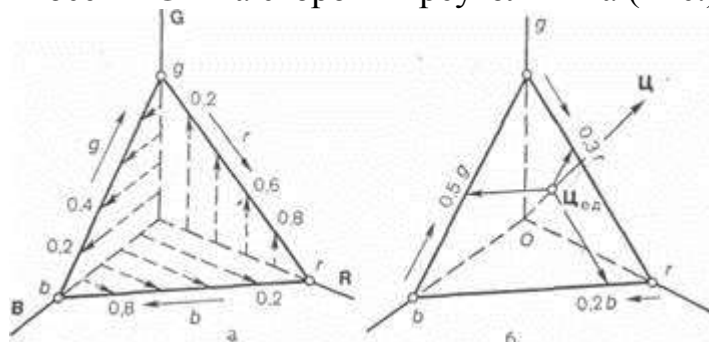


Рис. 6.5. Линии равной яркости

Выражение цветности. Свойства цветового треугольника

Чтобы выразить единичный цвет численно, нужно перенести координаты с пространственных осей RGB на стороны треугольника (Рис.).



Перенос цветковых координат (а) и пространственная интерпретация метода определения координат цветности (б)

Отсчет координат производится по направлению к вершине (по часовой стрелке), соответствующей данной координате.

Например. Пусть есть единичный цвет, заданный уравнением

$$Ц_{ед} = 0,3R + 0,5G + 0,2B. \text{ Сумма координат цветности равна единице.}$$

Чтобы найти r , нужно отсчитать эту координату по стороне gr . Для этого требуется из точки выражаемого единичного цвета $Ц_{ед}$ провести прямую, параллельную стороне bg (лежит против угла, соответствующего тому основному, координата которого отсчитывается). Так же находятся и другие координаты.

Как видно из рисунка, третья координата лишняя. Положение точки в плоскости треугольника определяется двумя координатами. Третья не свободна, а связана со значениями двух первых. Это следует из того, что рассматриваемый треугольник — часть плоскости единичных цветов. Так как сумма координат цветности равна единице, то по двум из них всегда можно найти третью. Например:

$$r = 1 - (g + b).$$

Аналогично для координат g и b .

Если, например, $r = 0,5$ и $g = 0,4$, то третья координата $b = 0,1$.

Пользуясь цветовым треугольником, можно складывать цвета.

Пусть есть треугольник цветности, находящийся в цветовом пространстве, и векторы цветов $Ц_1$ и $Ц_2$, а также суммарный вектор $Ц_{\Sigma}$.

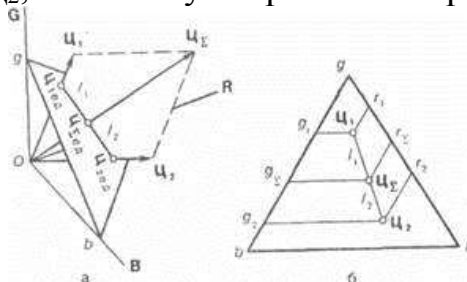


Рис. Схема сложения цветов в треугольнике цветности:
а — пространственная интерпретация; б — соотношения на плоскости

Плоскость параллелограмма складываемых цветов пересекает треугольник

по линии $\text{Ц}_{1\text{ед}}\text{Ц}_{2\text{ед}}$.

Тот же треугольник представлен в плоскости чертежа имеет вид. Из рис. 6.8, а и б следует:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{r_2 - r_\Sigma}{r_\Sigma - r_1} = \frac{g_\Sigma - g_2}{g_1 - g_\Sigma} \quad (6.3)$$

Если складываемые цвета Ц_1 и Ц_2 равны, то отрезки $l_1 = \text{Ц}_{\Sigma\text{ед}}\text{Ц}_{1\text{ед}}$ и $l_2 = \text{Ц}_{2\text{ед}}\text{Ц}_{\Sigma\text{ед}}$ одинаковы по длине и точка суммарной цветности лежит на середине $\text{Ц}_{1\text{ед}}\text{Ц}_{2\text{ед}}$. Если же яркости цветов неодинаковы, то линии отрезков $\text{Ц}_{1\text{ед}}\text{Ц}_{2\text{ед}}$ и $\text{Ц}_{2\text{ед}}\text{Ц}_{\Sigma\text{ед}}$ обратно пропорциональны модулям складываемых цветов.

Отношение $m_1/m_2 = l_2/l_1$ иногда называется правилом центра тяжести по аналогии с представлением о соотношениях между силами и плечами, принятым в механике.

Диаграмма $r-g$

Цветов, более насыщенных, чем спектральные, в природе не существует. Поэтому граница цветности реально наблюдаемых цветов определяется положением точек, выражающих спектральные цвета. Чтобы найти их на треугольнике, пользуясь значениями удельных координат, найденных экспериментально, составляют сначала уравнение цвета одноцветного монохроматического излучения от $\lambda = 400$ нм до $\lambda = 700$ нм в системе RGB . Далее рассчитывают модуль цветности и откладывают положение монохроматических излучений. Соединив точки сплошной линией получают locus спектральных цветов или просто locus (лат. *locus* — место), который и является границей цветностей реально существующих цветов. Лocus начинается от $\lambda = 400$ нм, доходит до $\lambda \approx 545$ нм, а затем совпадает со стороной gr треугольника цветности.

В спектре содержатся все цвета, кроме пурпурных. Чтобы получить полную совокупность максимально насыщенных цветов, locus замыкают прямой линией (на рисунке пунктир), на которой лежат единичные пурпурные максимальной насыщенности. Площадь, ограниченная locusом и замыкающей его прямой, называется полем реальных цветов. Вне этого поля лежат воображаемые цвета, более насыщенные, чем спектральные. На поле же находятся реальные, которые насыщены меньше лежащих на locusе.

На прямой, соединяющей любую точку locusа с белой, лежат цветности всех цветов, совпадающих по цветности со спектральными данной длины волны.

В практике трехкоординатная система выражения цветности неудобна. Поэтому эту громоздкую систему заменяют обычной прямоугольной.

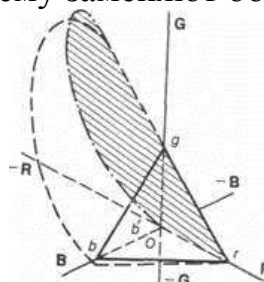


Рис. Проекционное преобразование треугольника rgb с locusом

Колориметрические свойства треугольника, полученного таким путем, не отличаются от свойств исходного равностороннего.

1. Значения цветовых координат цветов не изменяются от проекционного преобразования.

2. Насыщенность цветов по-прежнему возрастает от белой точки к локусу.

3. На прямой, проходящей через целую точку, лежат, как и в равностороннем треугольнике, цветности цветов постоянного цветового тона.

4. На прямой, соединяющей точки двух цветностей, находятся точки их суммарных цветов; расстояния точки суммарного цвета до точек складываемых цветов обратны модулям последних.

5. Белая точка имеет, как и раньше, координаты Б (1/3; 1/3).

6. Локус остается границей спектральных цветов.

7. Аликна остается линией нулевых яркостей.

Подобные проекционные преобразования в колориметрии применяются часто. Они упрощают определения и расчёты. При них сохраняются метрические свойства не только треугольника, но и цветового пространства.

Сетка прямоугольных координат с нанесенным на нее локусом, замкнутым прямой пурпурных цветов, называется *диаграммой цветности* или *цветовым графиком*.

Цветовой график можно использовать для определения доминирующей длины волны и колориметрической чистоты.

Цветовой тон. Возьмем на диаграмме цветности произвольную точку Ц. Пусть она имеет, например, координаты Ц (0,2; 0,6). Соединим ее с белой точкой и продолжим линию вверх до пересечения с локусом. На проведенной таким образом прямой изменяется только насыщенность, и точка пересечения $\text{Ц}_{\lambda=550}$ соответствует длине волны излучения, имеющего тот же цветовой тон, что и цвет Ц, т. е. доминирующей длине волны.

Так как пурпурных в спектре, а следовательно, на локусе нет, то для них рассматриваемая характеристика находится следующим образом. Возьмем вблизи линии пурпурных цвет П. Найдем цвет, тождественный ему по тону, но максимальной насыщенности. Для этого соединим точку П с белой точкой и продолжим прямую пересечения с линией пурпурных. Точка пересечения П выражает тот же цветовой тон, что и точка П. Продолжим теперь прямую ПБ в сторону локуса. Точка пересечения указывает длину волны $\lambda = 500$ нм. Это — цвет, дополнительный к П. Его длиной волны со знаком «штрих» обозначается точка П на линии пурпурных. В нашем примере доминирующая длина волны равна 500' нм.

Колориметрическая чистота цвета. Зная положение цвета Ц на диаграмме цветности, можно найти его колориметрическую чистоту p по формуле

$$p = \frac{B_{\lambda}}{B_{\lambda} + B_{Б}}$$

Заменив $B_{\lambda} + B_{Б} = B$, получим $p = B_{\lambda} / B$.

Для расчета колориметрической чистоты по данным, которые можно прочитать на диаграмме, следует яркости B_{λ} и B заменить их значениями:

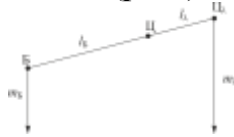
$$p = \frac{B_\lambda}{B} = \frac{m_\lambda}{m} \cdot \frac{L_\lambda}{L}$$

Преобразуем отношение m_λ/m так, чтобы к нему можно было приложить правило сложения цветов по формуле (6.3):

$$\frac{m_\lambda}{m} = \frac{m_\lambda}{m_\lambda + m_B} = \frac{1}{(m_\lambda + m_B)/m_\lambda} = \frac{1}{1 + (m_B/m_\lambda)}$$

Из правила центра тяжести (рис.) следует:

$$\frac{m_B}{m_\lambda} = \frac{\text{ЦЦ}_\lambda}{\text{ЦБ}}$$



Взяв отношение модулей m_B/m_λ вместо отношения отрезков

$$\frac{\text{ЦЦ}_\lambda}{\text{ЦБ}},$$

проведем обратное преобразование:

$$\frac{m_\lambda}{m} = \frac{1}{1 + (\text{ЦЦ}_\lambda/\text{ЦБ})} = \frac{1}{(\text{ЦБ} + \text{ЦЦ}_\lambda)/\text{ЦБ}} = \frac{\text{ЦБ}}{\text{Ц}_\lambda\text{Б}}$$

Из (6.4) будем иметь

$$p = \frac{\text{ЦБ}}{\text{Ц}_\lambda\text{Б}} \cdot \frac{L_\lambda}{L}$$

где первый сомножитель — отношение расстояния от точки определяемого цвета до белой к расстоянию от белой точки до локуса.

При определении p отношение L_λ/L выражается в световых единицах яркости, и, следовательно,

$$p = \frac{\text{ЦБ}}{\text{Ц}_\lambda\text{Б}} \cdot \frac{r_\lambda + 4,59g_\lambda + 0,06b_\lambda}{r + 4,59g + 0,06b}$$

Для практических расчетов отношение расстояний ЦБ/Ц_λБ заменяют пропорциональным ему отношением разностей координат, которое легко прочитывать по координатным осям диаграммы.

Для цветов, расположенных за локусом, чистота больше единицы.

Положение линии алихны. Яркость единичного цвета равна

$$B_u = 680 (rL_R + gL_G + bL_B).$$

Приравняв это уравнение нулю и выразив яркостные коэффициенты через соответствующие им яркости, получим для алихны:

$$680(r + 4,59g + 0,06b) = 0.$$

Уравнение выражает положение алихны в пространстве. Чтобы описать ее положение на плоскости, необходимо заменить b значением $1 - (r + g)$.

Подставив это значение координаты в уравнение, находим после преобразования

$$g = -0,208r - 0,013.$$

Угловому коэффициенту уравнения соответствует угол $\beta = 168^\circ$ относительно оси абсцисс. Проводя под этим углом прямую, отсекающую от оси ординат отрезок $g = -0,013$, получим алихну.

ЦВЕТОВАЯ МОДЕЛЬ СИЕ XYZ

Требования к основным цветам хуз

Основные цвета XYZ выбраны для максимального упрощения цветовых расчетов и измерений. Выбор был сделан так, чтобы обеспечить следующие свойства системы.

1. Яркостная характеристика цвета определяется не тремя составляющими цветового уравнения (как в системе RGB), а только одной.

2. Цветовое уравнение, выражающее любой реальный цвет, включая самые насыщенные — спектральные, не содержит отрицательных координат.

3. При указанных особенностях системы положение белой точки сохраняется в центре треугольника цветности и координаты белого цвета есть Б (1/3; 1/3; 1/3).

4. Одна из цветовых координат большого числа спектральных цветов равняется нулю, и эти цвета должны выражаться двучленными уравнениями.

Цветовой треугольник хуз

Цветовой треугольник хуз создавался на базе цветовой диаграммы *rg*. При этом сторона *xz* треугольника хуз должна совпадать с алихной. Третий основной цвет Y обладает яркостью. Его яркостный коэффициент удобно принять равным единице.

Переписав формулу для яркости в обозначениях системы XYZ, получим $B_{ц} = 680m (xL_x + yL_y + zL_z)$, или, принимая во внимание значения яркости коэффициентов ($L_x = 0$; $L_y = 1$; $L_z = 0$), $B_{ц} = 680my$, и, следовательно, $B_{ц} = 680Y$.

Таким образом, первая из целей, поставленных при разработке системы, достигается выбором двух основных цветов на алихне.

Для того чтобы координаты всех реальных цветов были положительными, locus нужно поместить внутрь треугольника цветности хуз, выбрав должным образом положения его сторон. Сторона *xz* совпадает с алихной, т.е. отвечает уравнению: $g + 0,208r + 0,013 = 0$.

Сторону *xу* рационально выбрать касательной к locusу. Этим достигается последняя цель, поставленная при разработке системы. При таком выборе все спектральные цвета, которые лежат на этой стороне, описываются двучленным уравнением $Ц = xX + yY$.

Сторона *уз* выбрана так, чтобы координаты вершин *у* и *z* имели следующие значения: *у* (—1,74; 2,77), *z* (—0,74; 0,14). При этом указанная сторона почти касается locusа в точке $\lambda = 505$ нм.

Следуя геометрическим преобразованиям получают уравнения осей в системе XYZ:

$$\begin{aligned}x &= 1,2750 r - 0,2778g + 0,0028 b; \\y &= -1,7393 r + 2,7673 g - 0,0280b; \quad (7.3) \\z &= -0,7431 r + 0,1409 g + 1,6022b.\end{aligned}$$

Полученный цветовой треугольник показан на рис. (распечатка). Его следует преобразовать, прежде всего, потому, что белая точка не находится в

центре треугольника и, следовательно, координаты белого цвета не равны между собой.

Цветовой треугольник xuz , показанный на рис. 7.2, как и треугольник rgb (рис. 6.3), — прямоугольный. В результате его проекционного преобразования (как в системе RGB) получают прямоугольный треугольник с локусом, находящимся внутри него, — цветовую диаграмму xu (рис. 7.4)

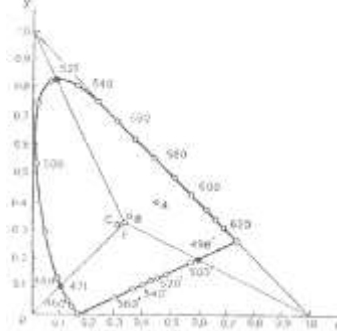


Рис. 7.4. Цветовая диаграмма xu ; определение доминирующей длины волны основных цветов этой системы

Для наглядности можно цветовые тона основных XYZ представить через доминирующую длину волны. Соединив вершины треугольника с белой точкой, найдем точки пересечения прямых с локусом. Эти точки указывают доминирующую длину волны каждого из основных.

Из рисунка следует: $\lambda_{dx} \approx 498 \text{ нм}$; $\lambda_{dy} \approx 521 \text{ нм}$; $\lambda_{dz} \approx 471 \text{ нм}$.

Особые плоскости в цветовом пространстве XYZ и цветовая диаграмма $x-y$

Так как сторона xz треугольника совпадает с алихной, то координатная плоскость xOz является одновременно и плоскостью нулевых яркостей. Ее иногда, как и линию безъярких цветов, называют алихной. В связи с тем что коэффициент $L_Y = 1$, координата вершины y равна яркостной колориметрической единице. Плоскость, параллельная xOz и проходящая через точку y , есть плоскость постоянной яркости, равной $B = 680 \text{ кд/м}^2$.

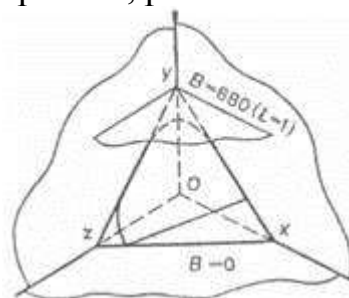


Рис. 7.5. Цветовое пространство XYZ

Проекция треугольника xuz (рис. 7.5) на плоскость xOy дает цветовую диаграмму xu (локус).

Свойства графика в общем тождественны свойствам уже рассмотренного графика rg , с той только разницей, что локус теперь не выходит за пределы первого квадранта плоскости.

Доминирующую длину волны находят так же, как и по диаграмме rg .

Для определения колориметрической чистоты цвета пользуются формулами:

$$p = \frac{y_{Ц} - y_{В}}{y_{\lambda} - y_{В}} \cdot \frac{y_{\lambda}}{y} \quad \text{или} \quad p = \frac{x_{Ц} - x_{В}}{x_{\lambda} - x_{В}} \cdot \frac{y_{\lambda}}{y}$$

Зная значение доминирующей длины волны и яркость цвета можно легко определить координаты этого цвета в цветовой системе XYZ. Часто осуществляют переход между координатными системами RGB и XYZ. Этот переход можно осуществить по диаграммам цветности. Однако этот процесс трудоемок. Поэтому пользуются следующим приемом.

Пусть цвет выражен уравнением в системе основных RGB:

$$Ц = RR + GG + BB.$$

Необходимо определить его в системе XYZ:

$$Ц = XX + YY + ZZ.$$

Для такого перехода нужно измерить координаты старых основных RGB в новых XYZ. Т.е.

$$R = X_R X + Y_R Y + Z_R Z;$$

$$G = X_G X + Y_G Y + Z_G Z;$$

$$B = X_B X + Y_B Y + Z_B Z;$$

Подставив эту систему в уравнение цвета в системе RGB получим:

$$Ц = R(X_R X + Y_R Y + Z_R Z) + G(X_G X + Y_G Y + Z_G Z) + B(X_B X + Y_B Y + Z_B Z) = \\ = (RX_R + GX_G + BX_B)X + (RY_R + GY_G + BY_B)Y + (RZ_R + GZ_G + BZ_B)Z.$$

Т. е. получаем формулы связи между координатами старой и новой системы:

$$X = RX_R + GX_G + BX_B;$$

$$Y = RY_R + GY_G + BY_B;$$

$$Z = RZ_R + GZ_G + BZ_B.$$

В результате расчета были получены следующие формулы:

$$X = 2,7689R + 1,7517G + 1,1302B;$$

$$Y = 1,0000R + 4,5907G + 0,0601B;$$

$$Z = 0,0565G + 5,5943B.$$

РАВНОКОНТРАСТНЫЕ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Пороговые эллипсы на графике x - y

Диаграммы rg и xu дают достаточно полные сведения о свойствах цветов. Зная положение точки на графике, нетрудно указать координаты цветности выражаемого ею цвета, определить яркость единичного цвета, доминирующую длину волны и колориметрическую чистоту. Легко найти сумму нескольких цветов и характеристики суммарного цвета. Однако указанные графики не дают точной информации о степени зрительного различия цветов, особенно контрастирующих по цветовому тону.

Исследователями была поставлена задача определения степени различаемости цветов в зависимости от их положения на диаграмме xu . Сложность задачи — в необходимости сравнивать цвета, которые неодинаковы сразу по нескольким параметрам. На поле цветовой диаграммы яркость, цветовой тон и насыщенность изменяются одновременно. Яркость падает по вертикали, насыщенность уменьшается по мере приближения к белой точке, цветовой тон изменяется по локусу. Пороги различения, определенные при изменении всех трех характеристик, называются цветовыми или порогами цветоразличения.

Впервые они были определены Джаддом, который нашел их расположение на диаграмме xu . Он показал, что точки цветов $A, B, C, D, E, F, G, H, J$, минимально отличимых от данного Ц , расположены по эллипсу. Точка данного цвета (т. е. исходная) находится в пересечении его осей (рис.). Указанные эллипсы были названы пороговыми.

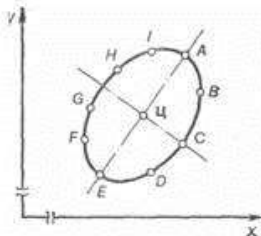


Рис. 8.1. Схема порогового эллипса

Их размеры, соотношения осей и их направление зависят от положения исходной точки Ц на графике. Мак-Адам, проведя тщательные исследования, уточнил размеры и положение пороговых эллипсов. Его данные легли в основу современных представлений о порогах цветоразличения. На рис. 8.2 показана полученная им диаграмма. Размеры эллипсов для наглядности увеличены им в десять раз.

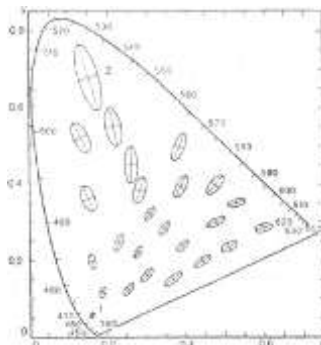


Рис. 8.2. Пороговые эллипсы на графике xu по Мак-Адаму

Из рисунка видно, что пороги цветоразличения неравномерно распределены по графику. В его нижней, «сине-фиолетовой», части две близко расположенные точки выражают цвета, сравнительно сильно различающиеся зрительно. Чувствительность глаза к изменению цветности здесь, велика. А в верхней, «зеленой», области даже минимально осязаемое изменение цветности выражается довольно далеко отстоящими друг от друга точками.

Число порогов цветоразличения между двумя цветами называется *цветовым контрастом*.

Равноконтрастная система CIE UVW (МКО–60)

Для того чтобы обойти неудобства, связанные с неравноконтрастностью системы XYZ, существуют два пути. Один из них состоит в создании формул пересчета, позволяющих переходить от характеристик, определяющих положение цветов на графике, к характеристикам, дающим представление о цветовом контрасте между ними. Наряду с этим целесообразно превратить цветовую диаграмму xu в такую, которая давала бы наглядное представление не только о координатах цветов, но и о цветовом контрасте между ними. Для этого нужно найти преобразование, которое позволило бы:

- 1) превратить пороговые эллипсы в окружности;
- 2) придать им одинаковые размеры;
- 3) не нарушать основных метрических свойств диаграммы. При этом оно должно быть достаточно простым, проективным.

В результате проекционного преобразования диаграммы xu с целью превращения пороговых эллипсов Мак-Адама в окружности было получено, что искажаются не только эллипсы, но и сам локус, координатная сетка, которая сжимается в верхней части и расширяется в нижней. Естественно, что пользоваться сеткой с непрерывно изменяющимся масштабом неудобно. Поэтому выбрана новая система координат, в которой масштаб не зависит от положения точки. Ось абсцисс обозначается буквой u , ось ординат — буквой v .

Проекционно преобразованный график Мак-Адама положен в основу равноконтрастной колориметрической системы, называемой по основным цветам системой UVW. Она была принята МКО в 1960 г. и поэтому часто называется системой МКО-60. Ее основные цвета, как и XYZ, нереальны.

Расчет по соотношениям проективной геометрии дает следующий переход от координат xuz к координатам uvw :

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}; \quad v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}$$

Поскольку система МКО-60 равноконтрастна, то расстояние между любыми двумя точками цветности на графике u, v выражает цветовой контраст, мера которого — число порогов цветоразличения.

Цветовой контраст ΔE равен

$$\Delta E = 100\sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2} = 100\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2},$$

где u_1, v_1 — координаты цветности C_1 ; u_2, v_2 — координаты цветности C_2 ; 100 — показатель, позволяющий выразить цветовой контраст в целых числах.

Зная координаты цветности двух цветов на графике xu , нетрудно рассчитать число порогов между ними. Для этого по формулам, связывающим координаты x , y и u , v , находят координаты сравниваемых цветов в равноконтрастной системе, а затем вычисляют ΔE .

Система МКО-60 разработана с довольно ограниченной целью получения равноконтрастной цветовой диаграммы.

Равноконтрастная система CIE Luv, CIE Lab (МКО-76)

В 1976 году была принята новая равноконтрастная система, МКО-76, которая использует два равноконтрастных пространства CIE Luv и CIE Lab.

Система CIE Luv представляет собой уточненное пространство UVW. Ее используют для оценки малых различий в аддитивном синтезе цвета, в частности, в телевидении. Величина L характеризует светлоту, остальные – цветности цветов. Формулы перехода следующие:

$$L = 116(Y / Y_0)^{1/3} - 16;$$

$$U = 13L(u - u_0);$$

$$V = 13L(v - v_0).$$

В формулах

$$Y / Y_0 \geq 0,01, \quad u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad v = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}.$$

u_0 , v_0 – координаты единичного белого цвета, определяемые по той же формуле, но для координат цветности источника света.

Яркость белой точки Y_0 нормируется на 100, т. е. принимается равной 100 единицам.

Цветовой контраст в этом пространстве:

$$\Delta E_{Luv} = \sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2 + (\Delta L)^2}.$$

Система CIE Lab базируется на нелинейных преобразованиях пространства XYZ и основана на системе Манселла. Она предназначена для оценки малых цветовых различий в субтрактивном синтезе цвета. Очень активно используется в полиграфии в программах обработки изобразительной информации и представления изображений.

Показатели цветности рассчитываются через координаты цвета системы XYZ. При этом светлота рассчитывается также, как в системе CIE Luv.

$$a = 500 \left[(X / X_0)^{1/3} - (Y / Y_0)^{1/3} \right];$$

$$b = 200 \left[(Y / Y_0)^{1/3} - (Z / Z_0)^{1/3} \right],$$

где X_0 , Y_0 , Z_0 – координаты цвета соответствующего колориметрического источника, X , Y , Z – координаты цвета измеренного образца.

Цветовой контраст между двумя цветами определяется формулой:

$$\Delta E_{Luv} = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

Считается, что малые цветовые различия находятся в диапазоне от 1 до 10 единиц цветового контраста. Различия более 10 единиц говорят о значительном цветовом контрасте.

В связи с нелинейностью преобразований пространства XYZ в пространство Lab невозможна метрология определения доминирующей длины волны и колориметрической чистоты цвета. Поэтому в нем для определения насыщенности и цветового тона используется пересчет в координаты LCH:

$$C \text{ (chroma – насыщенность)} = (a^2 + b^2)^{1/2}.$$

$$H \text{ (Hue – цветовой тон)} = \text{arctg}(b / a).$$

Для сравнения цветового охвата в координатах LCH правильнее строить тело цветового охвата, а затем производить сравнение для одинаковых уровней яркости.

Цветовой контраст ΔE равен

$$\Delta E = 100\sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2} = 100\sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2},$$

где u_1, v_1 – координаты цветности Ц_1 ;

u_2, v_2 – координаты цветности Ц_2 ;

100 – показатель, позволяющий выразить цветовой контраст в целых числах.

Зная координаты цветности двух цветов на графике xu , нетрудно рассчитать число порогов между ними. Для этого по формулам, связывающим координаты x, u и y, v , находят координаты сравниваемых цветов в равноконтрастной системе, а затем вычисляют ΔE .

Система МКО-60 разработана с довольно ограниченной целью получения равноконтрастной цветовой диаграммы.

Равноконтрастная система CIE Luv, CIE Lab (МКО-76)

В 1976 году была принята новая равноконтрастная система, МКО-76, которая использует два равноконтрастных пространства CIE Luv и CIE Lab.

Система CIE Luv представляет собой уточненное пространство UVW. Ее используют для оценки малых различий в аддитивном синтезе цвета, в частности, в телевидении. Величина L характеризует светлоту, остальные – цветности цветов. Формулы перехода следующие:

$$L = 116(Y / Y_0)^{1/3} - 16;$$

$$U = 13L(u - u_0);$$

$$V = 13L(v - v_0).$$

В формулах

$$Y / Y_0 \geq 0,01, \quad u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad v = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}.$$

u_0, v_0 – координаты единичного белого цвета, определяемые по той же формуле, но для координат цветности источника света.

Яркость белой точки Y_0 нормируется на 100, т. е. принимается равной 100 единицам.

Цветовой контраст в этом пространстве:

$$\Delta E_{Luv} = \sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2 + (\Delta L)^2}.$$

Система CIE Lab базируется на нелинейных преобразованиях пространства XYZ и основана на системе Манселла. Она предназначена для

оценки малых цветовых различий в субтрактивном синтезе цвета. Очень активно используется в полиграфии в программах обработки изобразительной информации и представления изображений.

Показатели цветности рассчитываются через координаты цвета системы XYZ. При этом светлота рассчитывается также, как в системе CIE Luv.

$$a = 500 \left[(X / X_0)^{1/3} - (Y / Y_0)^{1/3} \right];$$

$$b = 200 \left[(Y / Y_0)^{1/3} - (Z / Z_0)^{1/3} \right],$$

где X_0, Y_0, Z_0 – координаты цвета соответствующего колориметрического источника, X, Y, Z – координаты цвета измеренного образца.

Цветовой контраст между двумя цветами определяется формулой:

$$\Delta E_{Luv} = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

Считается, что малые цветовые различия находятся в диапазоне от 1 до 10 единиц цветового контраста. Различия более 10 единиц говорят о значительном цветовом контрасте.

В связи с нелинейностью преобразований пространства XYZ в пространство Lab невозможна метрология определения доминирующей длины волны и колориметрической чистоты цвета. Поэтому в нем для определения насыщенности и цветового тона используется пересчет в координаты LCH:

$$C \text{ (chroma – насыщенность)} = (a^2 + b^2)^{1/2}.$$

$$H \text{ (Hue – цветовой тон)} = \arctg(b / a).$$

Для сравнения цветового охвата в координатах LCH правильнее строить тело цветового охвата, а затем производить сравнение для одинаковых уровней яркости.

АППАРАТУРА ДЛЯ ЦВЕТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Общие сведения о колориметрической аппаратуре

Существуют два способа измерения цвета: спектрофотометрический и колориметрический.

Спектрофотометрический состоит в получении спектральной кривой объекта с последующим расчетом цветовых координат. Кривую отражения или пропускания для этой цели получают с помощью спектрофотометра. Спектрофотометрический способ измерения цветов относительно сложен, громоздок, но, с другой стороны, более точен, чем колориметрический, хотя при измерении темных цветов точность измерения снижается.

Колориметрический способ измерения цветовых координат состоит в их непосредственном определении на колориметре. Колориметры могут быть визуальными или фотоэлектрическими. Визуальные приборы позволяют оценивать тождество или различие половин фотометрического поля на основании зрительного наблюдения. В современной колориметрии они применяются редко. Действие фотоэлектрических колориметров основано на использовании фотоэлементов, экранированных светофильтрами, приводящими кривые спектральной чувствительности фотоэлементов к кривым сложения.

Особую категорию колориметров составляют компараторы цвета. Их назначение — измерение цветовых координат с большой точностью. Так, по данным Д. А. Шкловера, компаратор цвета ЭЦ-1 для светлых образцов не менее чувствителен, чем глаз, для темных — чувствительнее глаза. Название прибора (лат. *compara*—сравниваю) связано с тем, что указанная точность достигается в результате сравнения измеряемого образца с близким ему по цвету эталоном. Компараторы просты, практичны и, как правило, более дешевы, чем другие колориметрические приборы.

2. Нормализация условия освещения и наблюдения

Во всех колориметрических приборах соблюдаются определенные структуры световых пучков — падающего на образец и отражаемого от него, как говорят, та или иная геометрия пучков. Это связано с тем, что световые потоки, отраженные или пропущенные телами, распространяются в пространстве определенным образом. Отражение (и пропускание) во всех случаях описывается векторными диаграммами — индикатрисами рассеяния. Для их получения яркость или силу света в данном направлении представляют векторами. Индикатрисой называют поверхность, огибающую концы этих векторов.

На рисунке показана индикатриса силы света (точнее — ее сечение) некоторой поверхности, обладающей направленно-рассеянным отражением.



Рис. 9.1. Индикатриса рассеяния некоторой поверхности

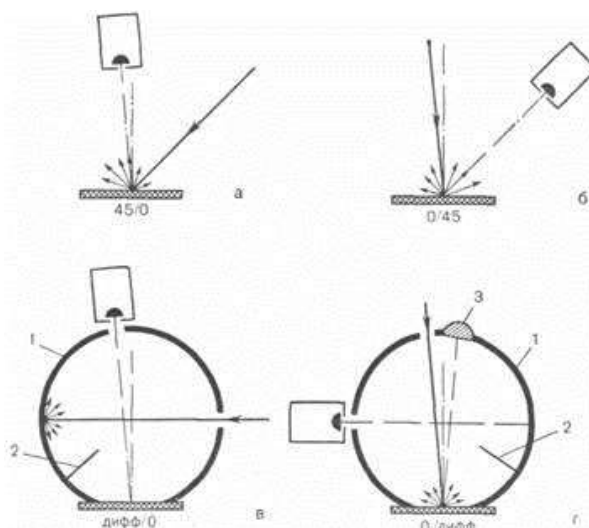
Из множества векторов выделены два. При их сравнении становится понятно, что сила света, отражаемого поверхностью, зависит от направления, в котором наблюдается эта поверхность. Из этого следует, что при фотометрических наблюдениях нужно условиться об углах освещения и наблюдения. Относя поток, отраженный в направлении OA , к падающему, получим одно значение коэффициента отражения, а выбрав направление OB — другое значение. Можно измерить и полный поток, отражаемый поверхностью. По данным такого измерения получим третье значение коэффициента. В связи с этим условия освещения и наблюдения в колориметрии нормируют. Для краткости их зашифровывают дробью: в числителе — условия освещения, в знаменателе — условия наблюдения. МКО устанавливает четыре нормы (рис. раздать):

$45^\circ/0$. Ось освещающего пучка составляет угол $45 \pm 5^\circ$ с нормалью к поверхности образца. Угол между направлением наблюдения и нормалью не должен превышать 10° , а угол раскрытия как освещающего, так и наблюдаемого пучков — не более 5° .

$0/45^\circ$. Условия освещения, сформулированные выше, становятся условиями наблюдения, а условия наблюдения — условиями освещения.

Дифф/0. Для освещения образца используют интегрирующую сферу — внутреннюю поверхность шара, покрытую окисью магния или сульфатом бария и поэтому идеально рассеивающую свет. Угол между нормалью к образцу и осью пучка освещения не должен превышать 10° . Угол раскрытия наблюдаемого пучка не более 5° . Экран, показанный на рисунке (зеркальная ловушка), уменьшает возможность попадания на образец или стенку шара прямого отраженного света (зеркальной составляющей).

0/дифф. Условия освещения, указанные в предыдущей норме, становятся условиями наблюдения, и наоборот.



Схемы условий освещения и наблюдения образца:

1 — интегрирующая сфера; 2 — экран; 3 — белая или черная насадка

Коэффициент отражения в фотометрии цветных образцов измеряется как апертурный. Апертурой (лат *apertura* — отверстие) называется простран-

ственный угол раскрытия светового пучка ω (угловая апертура).

Апертурный коэффициент отражения ρ_{λ}^0 находят, сравнивая потоки, отражаемые от абсолютно белого эталона и измеряемого образца. Образец и эталон находятся при этом в строго одинаковых условиях освещения и измерения. В частности, одинаковое направление имеют оси пучков и одинаковые углы раскрытия (и, следовательно, апертуры).

Атлас цветов «РАДУГА»

Кроме измерения, заключающегося в прямом определении цветовых координат или в их расчете по кривым сложения, существует еще один способ описания цвета. Это указание его аналога в некоторой системе образцов-эталонов, разработанной так, чтобы расположение эталонных цветов было строго закономерным. Зная эту закономерность, легко отыскать цвет образца, тождественный или, по крайней мере, близкий к определяемому. Системы расположения эталонов называются системами спецификации цветов.

В соответствии с принятой системой составляют альбом эталонов, называемый атласом цветов. В современных атласах цветовые координаты каждого образца указываются. Поэтому атлас — не только система цветов, но и визуальный колориметр. Его достоинства — простота, наглядность, компактность. Недостаток безинструментального метода измерения цвета — малая точность.

В полиграфии пользуются системами смешения красок. Они позволяют оформителям выбирать цвета, которые можно точно воспроизвести в данных условиях, а полиграфическим предприятиям — составлять смесевые краски по рецептурным таблицам атласа, без предварительных проб.

Цветовое тело содержит цвета, получаемые с помощью данного набора красок.

Примером системы смешения служит разработанный во ВНИИКПП И. С. Файнбергом с сотрудниками атлас «Радуга».

В основе системы находится триада красок субтрактивного синтеза: желтая краска (на основе пигмента желтого прозрачного О), пурпурная (на основе лака рубинового СК) и голубая (фталоцианиновый Б43У). Кроме того, были использованы краски, обеспечивающие бинарные цвета, т. е. получаемые в обычных условиях наложением двух красок субтрактивного синтеза. Это — красная (пигмент ярко-красный 2С), зеленая (пигмент зеленый фталоцианиновый) и синяя (лак основной фиолетовый). Для того чтобы компенсировать потери насыщенности при смешении красок указанных двух типов (они, как и другие, имеют поглощение по всему спектру), применялось еще несколько красок промежуточных цветов.

Образцы промежуточных цветов обеспечивают равномерное заполнение цветового пространства. В круге 8 опорных и 24 промежуточных, а всего 36, как их назвали авторы, базовых цветов. Эти цвета были выбраны таким образом, чтобы цветовое различие по цветовому тону между соседними образцами не превышало $\Delta E = 10$. Для каждого цвета получены 7-польные тоновые ряды смешением соответствующих хроматических красок или их смесей с черной и белой.

Всего в атласе 259 образцов-эталонов цвета.

В таблицах атласа даны как колориметрические характеристики, так и рецептура красок для каждого из образцов. Это позволяет воспользоваться рецептом краски, обеспечивающей получение нужного цвета либо по его колориметрическим характеристикам, либо по положению в системе.

Таким образом, курс «Теории цвета» рассматривает не только цвета как систему излучений, но и результаты их воспроизведения в полиграфии.